

## EFFECTO DE NIVELES CRECIENTES DE VIENTO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN TANQUES DE GASOLINA EXPUESTOS A FUEGO

### EFFECT OF INCREASING WIND LEVELS ON THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURES IN GASOLINE TANKS EXPOSED TO FIRE

Susana N. Espinosa<sup>a</sup>, Rossana C. Jaca<sup>b</sup> y Luis A. Godoy<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [susana.espinosa@fain.uncoma.edu.ar](mailto:susana.espinosa@fain.uncoma.edu.ar)*

<sup>b</sup> *Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar](mailto:rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar)*

<sup>c</sup> *CONICET y FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina, [luis.godoy@unc.edu.ar](mailto:luis.godoy@unc.edu.ar)*

**Palabras claves:** elementos finitos, fuego, radiación, tanques de combustible, viento

**Resumen.** Datos estadísticos recientemente publicados indican que los accidentes en cadena más frecuentes están asociados a fuego, de los cuales la tercera parte ocurre en áreas de almacenamiento de combustibles y fluidos inflamables. Las pérdidas económicas, ambientales e incluso de vidas humanas producidas por estos eventos impulsa líneas de investigación para determinar las variables fundamentales que influyen mayormente sobre la propagación del fuego. En trabajos previos estudiamos el efecto térmico de una llama sobre tanques vecinos en diferentes escenarios. En este trabajo consideramos un escenario de vientos crecientes y analizamos la distribución de temperaturas teniendo en cuenta que el viento atmosférico modifica la inclinación de la llama y aumenta la radiación incidente sobre los tanques ubicados en dirección del viento. Los resultados numéricos muestran que las temperaturas máximas aumentan en mayor proporción en el lateral superior y techo de los tanques como consecuencia del aumento del viento atmosférico, debilitando en forma creciente la estructura de los tanques. Cuando los vientos superan los 45 km/h, se produce el contacto directo del fuego sobre la superficie superior de un tanque vecino, aumentando la probabilidad de generación de una llama secundaria y el riesgo de efectos dominó. Esta situación extrema podría evitarse aumentando las distancias de separación entre tanques en zonas donde prevalecen vientos fuertes.

**Keywords:** finite elements, fire, fuel tanks, radiation, wind

**Abstract.** Recently published statistical data indicates that the most frequent chain accidents are associated with fire and a third of these occur in storage areas of fuels and flammable fluids. The economic, environmental and even human live losses produced by these events drive research lines to determine the variables that mainly influence the spread of fire. In previous works we studied the thermal effect of a flame on neighboring tanks under different fire scenarios. In this work, a scenario of increasing winds is considered and the temperature distribution is analyzed by taking into account that the atmospheric wind modifies the inclination of the flame and increases the incident radiation in those tanks located in the direction of the wind. The numerical results show that with the increase of wind speed, the maximum temperatures increase in a greater proportion in the upper side and the roof of the tanks, thus weakening the structure of the tanks. For wind speeds above 45 km/h, direct contact of fire on the upper surface of a neighboring tank increases the probability of generating a secondary flame and the risk of domino effects. This extreme situation could be avoided by increasing the separation distances between tanks in areas where strong winds prevail.

## 1 INTRODUCCIÓN

La concentración de tanques de almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, líquidos inflamables y combustibles, constituye una potencial área de riesgo. La generación de fuego en un tanque se produce en un alto porcentaje al realizar tareas de mantenimiento o llenado o vaciado de tanques, aunque también puede ocurrir debido a problemas estructurales en los tanques, tales como fisuras, o incidentes naturales, generalmente rayos. A medida que el fuego se desarrolla, aumenta la vulnerabilidad de los tanques vecinos a la llama y la probabilidad de escalado del evento primario a toda la planta, en lo que se conoce como efecto dominó. Según los resultados publicados por [Reniers y Cozzani \(2013\)](#), los accidentes en cadena más frecuentes están asociados a fuego, de los cuales el 30% ocurre en áreas de almacenamiento, fundamentalmente cuando se almacenan fluidos inflamables. Existe una extensa cantidad de accidentes reportados en literatura ([Chang y Lin, 2006](#), [Johnson, 2010](#), [Batista-Abreu y Godoy, 2011](#), [Sharma et al., 2013](#), [Mishra et al., 2013](#), [Abbasi et al., 2014](#), [Argenti et al. 2014](#)), que han originado importantes pérdidas económicas y ambientales, e incluso, en algunos casos, pérdidas de vidas humanas.

Con el objetivo de analizar la vulnerabilidad de tanques de almacenamiento expuestos a fuego, el modelado y la simulación numérica constituyen una herramienta fundamental, evitando los altísimos costos asociados a experimentos físicos y permitiendo realizar análisis simplificados para determinar la incidencia de las múltiples variables que ocurren en diferentes escenarios de fuego. Varios autores reportan comportamientos térmico y termo-estructural en tanques de almacenamiento de combustible bajo fuego (ver, por ejemplo, [Liu, 2011](#), [Sengupta et al., 2011](#), [Godoy y Batista-Abreu, 2012](#), [Mansour, 2012](#), [Da Silva Santos y Landesmann, 2014](#), [Abbassi et al., 2014](#), [Espinosa y Jaca, 2016](#), [Godoy L.A., 2016](#), [Espinosa et al., 2015, 2017, 2018](#), [Jaca et al., 2016, 2017](#)). Sin embargo, sólo unos pocos autores consideran el efecto del viento, generalmente a velocidad de 5 m/s.

El propósito de este estudio es evaluar el comportamiento térmico de tanques de almacenamiento de combustible por efecto del fuego desarrollado en un tanque vecino en un ambiente de vientos crecientes. Por lo tanto, estimamos las variaciones relativas en los perfiles de temperatura sobre el tanque más expuesto a la radiación de la llama cuando la misma se extiende verticalmente o se inclina de acuerdo a la magnitud del viento reinante, considerando vientos de 0 m/s, 2.3 m/s, 3.5 m/s, 7 m/s y 12.5 m/s. Adicionalmente, para cada intensidad del viento se consideran dos posiciones extremas de la llama en el tanque bajo fuego.

## 2 CASOS DE ESTUDIO

Consideremos una batería de  $N$  tanques (ver Figura 1 (a)) de dimensiones idénticas con una relación unitaria entre el diámetro  $D$  y la altura  $H$ , separados entre sí por una distancia  $d=1D$  de cáscara a cáscara. El fuego se inicia en uno de los tanques (TK2), denominado tanque fuente, incidiendo en mayor proporción sobre el tanque adyacente que se encuentra en la dirección del viento (TK1), al que denominamos tanque objetivo. La radiación incidente sobre el resto de los tanques (por ejemplo TK3) será menor o a lo sumo igual a aquella que incide sobre el tanque objetivo, lo que nos permite simular el problema con un modelo simple de dos tanques, uno representando al tanque fuente y otro al tanque objetivo, como se muestra en la Figura 1 (b). Se supone que el tanque fuente contiene gasolina y está abierto a la atmósfera. La combustión de gasolina produce una llama que asciende desde el tope o desde la base del tanque fuente, inclinándose en la dirección del tanque objetivo con un ángulo  $\varphi$  que aumenta al incrementarse la intensidad del viento reinante. Los tanques son de acero A36 y tienen un diámetro  $D = 11.44$  m y una altura  $H=D$ . El tanque objetivo tiene techo cónico de 1m de altura y se considera vacío

debido a que esta situación es la más extrema, por estar asociada a las máximas deformaciones térmicas sobre la cáscara (Jaca et al., 2016, 2017). El efecto de valores crecientes de viento actuando en simultáneo con el fuego modifica la inclinación de la llama y altera la distribución de temperaturas en el tanque objetivo, incrementando las temperaturas máximas sobre la superficie lateral y el techo. En este trabajo se simularon cinco velocidades de viento,  $u_\infty$ , en el rango de 0 a 12.5 m/s, con lo que se aumenta la inclinación de la llama hacia el tanque objetivo.

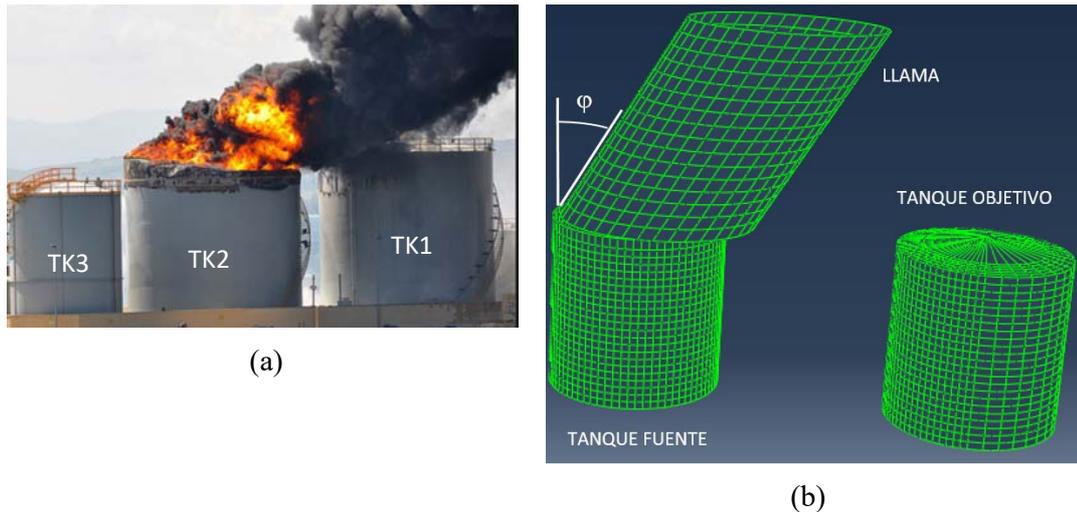


Figura 1: (a) Fuego en una batería de  $N$  tanques de almacenamiento de combustible, Gibraltar, 2011 ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oil\\_sullage\\_tank\\_burns\\_after\\_explosion.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oil_sullage_tank_burns_after_explosion.jpg))  
 (b) Modelo simplificado considerando sólo dos tanques (TK1: tanque fuente, TK2: tanque objetivo). El ángulo  $\varphi$  mide la inclinación de la llama por efecto del viento actuando en dirección al tanque objetivo.

## 2.1 Geometría y potencia emisiva de la llama

En el presente estudio utilizamos el modelo de llama sólida, que considera una llama cilíndrica o elíptica, de igual diámetro que el tanque fuente y cuya altura se determina por métodos empíricos que tienen en cuenta las propiedades físico-químicas del combustible que está combustionando y la intensidad del viento actuante sobre la llama.

El modelo de llama sólida se representa en la Figura 2, donde se indican los parámetros geométricos característicos de una llama que se eleva verticalmente (Figura 2a) con altura  $H_f$  y diámetro  $D_f=D$ , y de una llama que se desarrolla en presencia de viento (Figura 2b) inclinándose un ángulo  $\varphi$  desde la vertical. En este último caso se necesita un mayor número de parámetros para definir la llama ya que su longitud  $L_f$  difiere de su altura  $H_f$  y ésta se desplaza respecto de su base con un desplazamiento  $\Delta D$ , bajando desde el borde del tanque una altura  $H_s$  conocida como depresión de la llama. Por otro lado, si bien la llama se inicia generalmente en la parte superior del tanque fuente, a medida que el fuego se desarrolla la estructura se debilita, pudiendo derramarse combustible, con lo que el fuego envuelve completamente al tanque fuente. Con el objetivo de tener en cuenta estas dos situaciones extremas, analizamos el efecto de la posición de la llama sobre la distribución de temperaturas del tanque objetivo, considerando una llama actuando desde la parte superior del tanque fuente (llama alta) o, alternativamente, una llama actuando desde el nivel del suelo.

Los parámetros geométricos que representan la llama se obtienen por medio de ecuaciones empíricas desarrolladas para los casos con y sin viento. Entre las más utilizadas se encuentran las correlaciones de Thomas (1963), fundamentalmente porque se basan en el comportamiento

de un gran número de datos experimentales y también debido a su simplicidad. En el presente trabajo la geometría de la llama desarrollándose en un ambiente de aire quieto (llama vertical) como en presencia de viento (llama inclinada) fue obtenido con las correlaciones de Thomas combinadas con datos experimentales reportados por [Babrauskas \(1983\)](#) para gasolina.

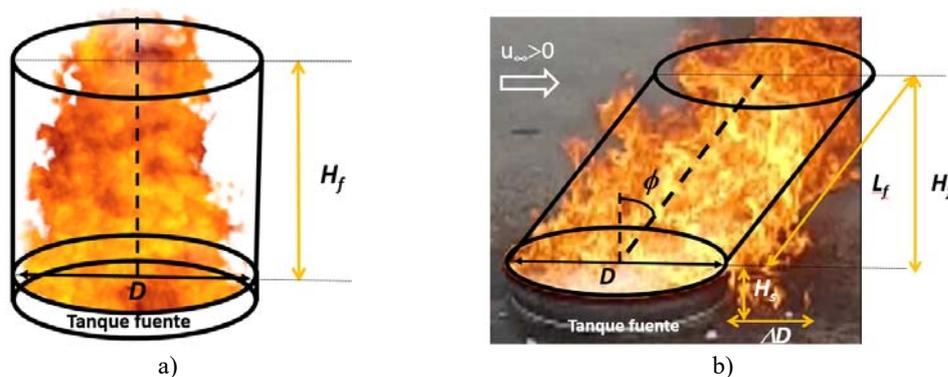


Figura 2: Modelo de llama sólida y parámetros geométricos característicos: a) en ausencia de viento, b) con viento a velocidad  $u_{\infty}$ .

La radiación emitida por la llama se estima en base al modelo bicapa que describe adecuadamente la combustión observada experimentalmente para hidrocarburos. Se define entonces una zona inferior de longitud  $L_c$ , donde se produce una llama clara de alta potencia emisiva y una superior, de longitud  $L_f - L_c$ , donde la llama es oscurecida por la formación de humo u hollín, reduciendo la radiación emitida por su superficie. La correlación de [Pritchard y Binding \(1992\)](#) permite estimar la longitud de ambas capas en función del combustible que se está quemando, del diámetro del estanque y de la velocidad del viento.

Las ecuaciones utilizadas para determinar la geometría de la llama pueden consultarse en trabajos previos (Espinosa y Jaca, 2016)

Los resultados obtenidos en esta sección se muestran en la Tabla 1 para las 5 velocidades de viento consideradas en el presente trabajo:

Llama	$u_{\infty} = 0$ m/s	$u_{\infty} = 2.3$ m/s	$u_{\infty} = 3.5$ m/s	$u_{\infty} = 7$ m/s	$u_{\infty} = 12.5$ m/s
Altura, $H_f$ [m]	17.5	13.7	10.2	6.2	3
Longitud total, $L_f$ [m]	17.5	15.8	14.5	21.8	11
Longitud zona clara, $L_c$ [m]	2.1	2.4	2.6	2.9	3.3
Inclinación, $\varphi$ [grados]	0	30	45	60	68
Desplazamiento, $\Delta D$ [m]	-	1.97	2.7	4.5	7
Depresión, $H_s$ [m]	-	0.66	0.9	1.5	3

Tabla 1: Parámetros geométricos de llama estimados para 5 velocidades crecientes de viento

La radiación emitida desde la superficie de la llama es obtenida por el modelo de [Mudan y Croce \(1996\)](#) que considera una potencia emisiva máxima para la capa inferior donde la llama es más clara y radiante, y una potencia emisiva menor para la capa superior, debido a la presencia de humo. La potencia emisiva máxima,  $E_{max} = 140 \text{ kW/m}^2$  corresponde a la emitida por un cuerpo negro a la temperatura de combustión de la gasolina, de aproximadamente 1250 K. La potencia emisiva de la zona superior disminuye al aumentar el volumen de humo

generado, el que a su vez se incrementa con el diámetro del tanque debido a la dificultad de ingreso de oxígeno al centro del mismo, reduciendo por lo tanto la eficiencia de la combustión. La correlación de Mudan y Croce tiene en cuenta esta característica estimando una potencia emisiva promedio para la zona superior,  $E_{av}$ , asumiendo un valor constante de  $E_{hollin}=20 \text{ kW/m}^2$  para el hollín y considerando un factor de obscuración dependiente del diámetro del estanque. Las siguientes ecuaciones fueron utilizadas para estimar la potencia emisiva de la llama clara y oscura, respectivamente:

$$E = E_{max} \quad (1)$$

$$E_{av} = E_{max} \text{Exp}[-0.12 D] + E_{hollin} (1 - \text{Exp}[-0.12 D]) \quad (2)$$

Sólo una fracción de la radiación emitida por la llama incide sobre el tanque objetivo, fundamentalmente debido a la geometría relativa de los tanques que afecta el *factor de visión* o *factor de forma*, y en menor proporción, a la transmisividad atmosférica, que atenúa la energía radiante transmitida entre llama y tanque por efecto del vapor de agua y dióxido de carbono presentes en la atmósfera. La transmisividad atmosférica es fácilmente calculada por el método de Wein en función de la distancia recorrida, la humedad relativa del aire y la presión de saturación del agua a temperatura ambiente. Sin embargo, mientras el factor de visión es calculado al implementar el modelo de elementos finitos para el conjunto llama-tanque objetivo, la transmisividad atmosférica es tenida en cuenta estimando para cada zona de la llama una temperatura media efectiva que representa la temperatura de una llama hipotética radiando con potencia emisiva promedio,  $\tau E_{f_{av}}$ :

$$T_{ef} = \left( \frac{\varepsilon_f \sigma T_a^4 + \tau E_{f_{av}}}{\varepsilon_f \sigma} \right)^{0.25} \quad (3)$$

donde  $\varepsilon_f$  es la emisividad de la llama,  $\sigma$  es la constante de Stefan/Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),  $\tau$  es la transmisividad atmosférica y  $T_a$  la temperatura ambiente en K.

De este modo, la introducción del concepto de temperatura media efectiva simplifica enormemente el modelo de elementos finitos, reduciendo el costo computacional al considerar sólo el mallado de los dos tanques de interés y la llama, sin incluir el medio que los rodea.

## 2.2 Modelo computacional y modelo de transferencia de calor

El modelo numérico se basa en técnicas de elementos finitos y es implementado utilizando el software comercial ABAQUS-Simulia (Dassault Systems, 2006). Un riguroso modelo de transferencia de calor en régimen estacionario es implementado utilizando ABAQUS estándar por medio de elementos de transferencia de calor cuadrangulares y triangulares de seis y ocho nodos (DS6 y DS8), considerando interacciones del tipo *surface film condition* para considerar la transferencia de calor por convección, y del tipo *cavity radiation* para considerar la radiación intercambiada.

En el análisis de transferencia de calor se tuvieron en cuenta las siguientes contribuciones para el tanque objetivo, ordenadas en forma decreciente de acuerdo a su relevancia:

1. Radiación externa llama-tanque-medio ambiente, considerando emisividad unitaria para la llama (cuerpo negro), emisividad de 0.8 para la superficie externa del tanque objetivo,

y factores de visión evaluados internamente por ABAQUS de acuerdo a la distancia y posición relativa de cada elemento del tanque objetivo respecto a cada elemento finito de la llama.

2. Radiación interna, considerando superficies no oxidadas de emisividad 0.3 y transmisividad unitaria para el aire interno.
3. Convección forzada externa para el caso de viento.
4. Convección natural interna y externa para el caso de aire quieto.
5. Conducción a través del acero.

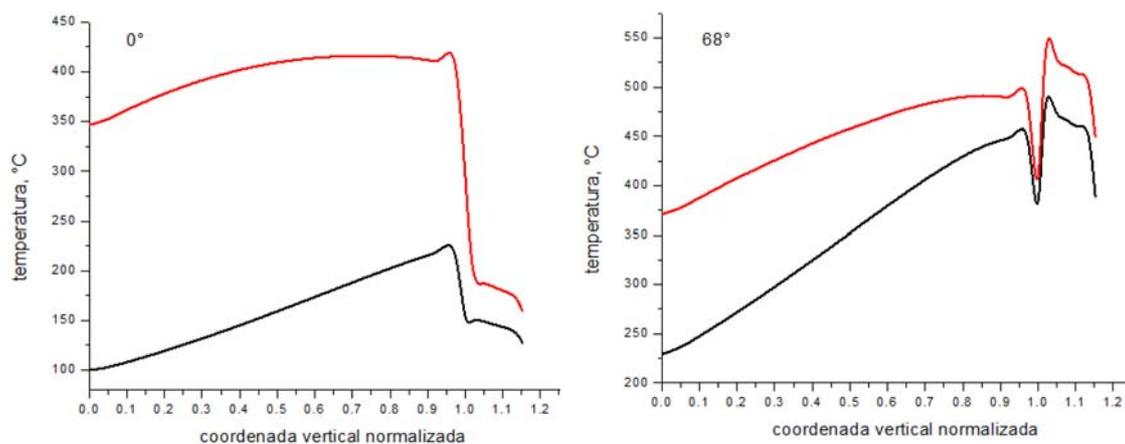
Las propiedades del acero y aire se introdujeron en el modelo en función de la temperatura. Los coeficientes de convección fueron incorporados en el modelo de forma rigurosa en función de las propiedades del fluido y de la temperatura de la superficie en los tanques. En el modelo numérico se introdujeron las correlaciones de Churchill y Chu para convección natural y la correlación de Zhukaukas (Incropera-DeWitt, 2002) para convección forzada en términos del coeficiente de película,  $h$ , como función de la temperatura de la superficie.

Se estimó la transmisividad atmosférica por el Método de Wayne y la temperatura ambiente se fijó en 20°C. Para más detalles sobre el modelo de transferencia de calor se refiere al lector a trabajos previos (Espinosa y Jaca, 2016).

### 3 RESULTADOS

Los efectos térmicos provocados sobre tanques adyacentes a un tanque de almacenamiento de gasolina bajo fuego y viento fueron analizados utilizando técnicas numéricas. Se evaluaron cinco casos considerando que la llama se desarrolla en un ambiente con velocidades crecientes de viento que van desde 0 hasta 45 km/h. En el escenario analizado la intensidad del viento modifica los parámetros geométricos de la llama (ver Tabla 1) inclinándola en dirección al tanque objetivo y alterando el balance de energía sobre el mismo. Como consecuencia de la energía neta intercambiada por el tanque objetivo, se modifican los perfiles de temperatura estacionarios sobre la superficie de la cáscara y sobre el techo cónico.

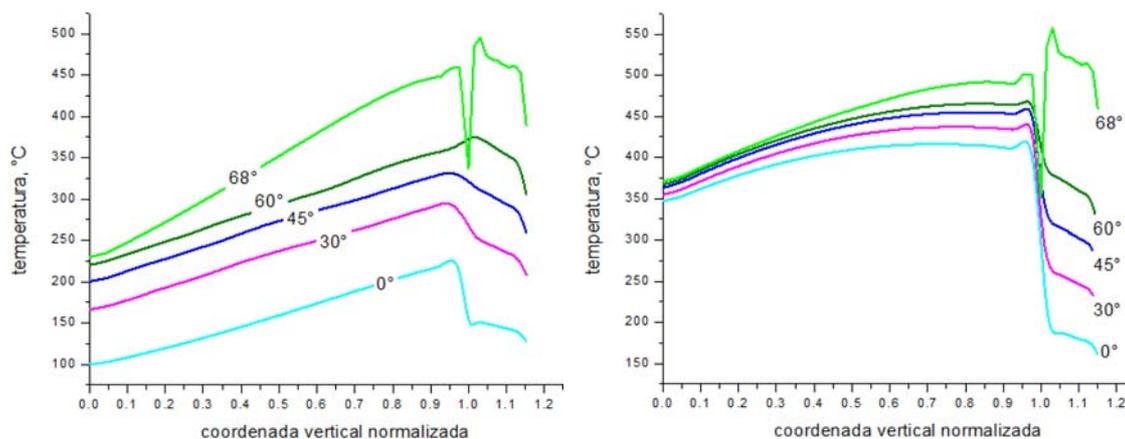
La Figura 3 compara los perfiles de temperatura extremos sobre el tanque objetivo. La escala del eje de abscisas fue normalizada con la altura del tanque y extendida para incluir la superficie lateral y el techo del tanque objetivo. En la Figura 3 (a) la llama asciende verticalmente desde dos posiciones distintas del tanque fuente. Cuando se inicia el fuego la llama se produce en la superficie superior del tanque donde el combustible almacenado se combina con el aire ambiente. En este caso, la temperatura sobre la coordenada vertical del tanque vecino aumenta desde 100°C en su base hasta un máximo de 220°C en la intersección de la cáscara y el techo, disminuyendo hacia la parte posterior del techo, debido a que esta zona no es alcanzada directamente por la radiación de la llama. Si el fuego se desarrolla envolviendo todo el tanque fuente, aumentan considerablemente las temperaturas sobre la superficie lateral, desde unos 350°C en la base hasta 400°C en la intersección con el techo, disminuyendo nuevamente sobre el mismo. La disminución de temperaturas sobre el techo como consecuencia de la posición relativa de la llama y el techo cónico se considera por el factor de visión o de forma, calculado numéricamente para cada par de elementos finitos llama-tanque objetivo. En el otro extremo, la Figura 3 (b) muestra los perfiles de temperatura cuando la velocidad del viento es de 45 km/h, haciendo que la llama se incline unos 68° hacia el tanque objetivo y reduciendo las distancias entre la llama y el tanque. La parte superior de la llama prácticamente toca el techo por lo que las temperaturas máximas se dan sobre la superficie del techo. Nuevamente el factor de visión es el responsable de la abrupta caída de temperatura que se observa en ambos perfiles de la Figura 3 (b), en la intersección de cáscara y techo, cuando  $y/H=1$  sobre el eje de abscisas.



(a) — llama desde el tope, — llama desde la base (b) — llama desde el tope, — llama desde la base

Figura 3: Perfiles de temperatura estacionarios sobre la coordenada vertical enfrentada a la llama (superficie lateral,  $0 \leq y/H \leq 1$ , y techo,  $y/H > 1$ ). (a) sin viento ( $\varphi=0^\circ$ ), (b) con viento a velocidad de 45 km/h ( $\varphi=68^\circ$ )

Las Figuras 4 y 5 comparan perfiles de temperatura sobre la coordenada vertical y circunferencial, respectivamente, para los cinco casos de interés en este estudio y dos posiciones de la llama en el tanque fuente.



(a) Llama desde el tope del tanque fuente

(b) Llama desde la base del tanque fuente

Figura 4: Comparación de perfiles de temperatura estacionarios sobre la coordenada vertical del tanque objetivo enfrentada a la llama (superficie lateral,  $0 \leq y/H \leq 1$ , y techo,  $y/H > 1$ ), para cinco inclinaciones de la llama en la dirección del tanque objetivo. Los ángulos indicados se miden desde la vertical y corresponden a velocidades crecientes de viento desde 0 hasta 45 km/h (ver Tabla 1). La distancia entre los tanques es de un diámetro. El tanque objetivo se encuentra vacío.

En ambas figuras puede notarse que cuando la llama se extiende desde el nivel del suelo (Figuras 4 (b) y 5 (b)) los perfiles se desplazan a zonas de mayor temperatura, siendo menor la diferencia de temperatura para los cinco casos que cuando la llama se desarrolla desde la superficie superior del tanque fuente (Figuras 4 (a) y 5 (a)). Por otro lado, debido a que la radiación de la llama incide fuertemente sobre la superficie del tanque objetivo enfrentada

a la llama, las temperaturas máximas se establecen en  $\theta=0$ , disminuyendo hasta temperaturas levemente superiores a la ambiente de  $20^{\circ}\text{C}$  en la superficie posterior del tanque objetivo ( $\pi/2 \leq \theta \leq 3/2\pi$ ).

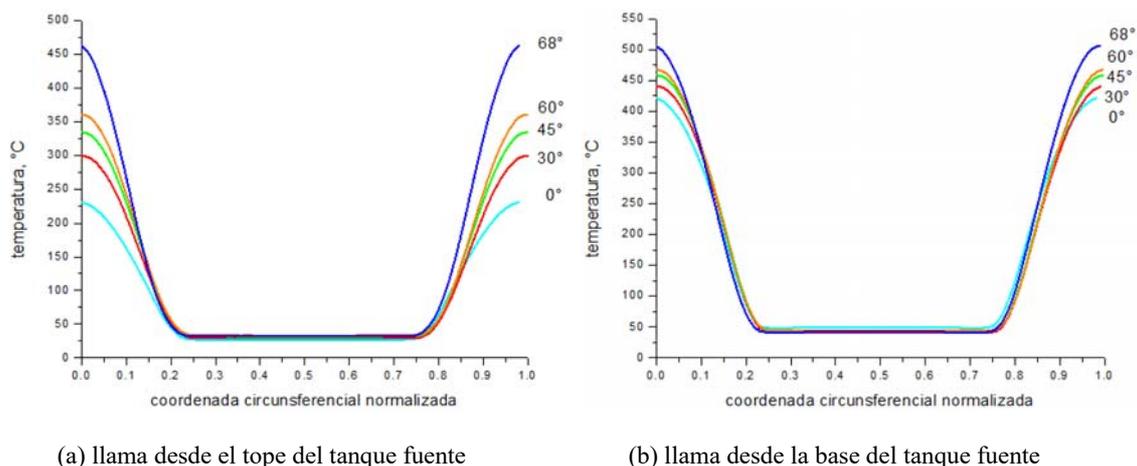


Figura 5: Comparación de perfiles de temperatura estacionarios sobre la coordenada circunferencial del tanque objetivo a 0.5m del borde superior, para cinco inclinaciones de la llama en la dirección del tanque objetivo.

#### 4 CONCLUSIONES

En este estudio consideramos una batería de tanques de iguales dimensiones, en uno de dichos tanques se ha originado una llama, y buscamos determinar cómo se afectan térmicamente los tanques vecinos en un escenario de vientos crecientes. En particular se consideró el tanque adyacente que se encuentra en la dirección del viento, sobre el que incidirá la mayor potencia emisiva de la llama, de modo que las temperaturas estimadas en este trabajo son las máximas posibles para la batería de tanques estudiada.

Por medio de un riguroso modelo de transferencia de calor implementado en ABAQUS por elementos finitos, se determinaron los perfiles de temperatura considerando dos posiciones de actuación de la llama y cinco velocidades de viento. De acuerdo a nuestros resultados, las temperaturas máximas estimadas sobre el tanque objetivo se producen cuando el fuego envuelve al tanque fuente y la llama se extiende desde el nivel del suelo. Asimismo, se observó que los perfiles de temperatura calculados sobre la coordenada vertical enfrentada a la llama se desplazan prácticamente en forma paralela hacia zonas de mayor temperatura cuando los vientos aumentan desde 0 hasta 25 km/h. Sin embargo, a velocidades del orden de 45 km/h la inclinación de la llama aumenta considerablemente la radiación incidente sobre el lateral superior y el techo, aumentando la pendiente del perfil de temperatura respecto a los casos anteriores. Cuando los vientos superan los 45 km/h, se produce el contacto directo del fuego sobre la superficie superior del tanque objetivo, aumentando la probabilidad de generación de una llama secundaria y el riesgo de efectos en cadena. Por esta razón, las baterías de tanques ubicadas en zonas donde los vientos fuertes son frecuentes deberían construirse con distancias de separación entre tanques superiores a un diámetro, de modo de reducir la vulnerabilidad del resto de los tanques si eventualmente se produjera un incendio en uno de ellos.

## REFERENCIAS

- Abbassi, M., Benhelal, E., Ahmad, A., Designing an Optimal Safe Layout for a Fuel Storage Tanks Farm: Case Study of Jaipur Oil Depot. *Int. J. of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering*, 2:157-165, 2014.
- ABAQUS. Simulia. Unified FEA. Dassault Systems. Warwick, Rhode Island. USA, 2006.
- API 650. Welded steel tanks for oil storage. *American Petroleum Institute*, 2010.
- 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.
- Babrauskas, V., Estimating Large Pool Fire Burning Rates. *Fire Technology*, 19:251-261, 1983.
- Batista-Abreu J., Godoy L. A., Investigación de causas de explosiones en una planta de almacenamiento de combustible en Puerto Rico, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11(2):109-122, 2011.
- Chang, J. and Lin, C., A study of storage tanks accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19:51-59, 2006.
- Da Silva Santos and F., Landesmann, A., Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire. *Fire Safety Journal*, 69:57-68, 2014.
- Espinosa, S.N., Jaca, R.C. y Godoy, L.A., Incidencia del viento en la deformación térmica tanques de almacenamiento de combustible expuestos a fuego, Proc. 3° CILASCI, *Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio*, Porto Alegre, Brasil, 2015.
- 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. y Godoy, L.A., Diseño de una batería de tanques de almacenamiento de combustible: análisis térmico. *Mecánica Computacional*, 35: 2111-2125, 2017.
- Espinosa, S.N., Jaca, R.C. y Godoy, L.A., Thermal and structural analysis of a fuel storage tank under an adjacent pool fire, en prensa, *Fire Research*, Agosto de 2018.
- Godoy L.A., Batista-Abreu J., Buckling of fixed roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire, *Thin-Walled Structures*, 52: 90-101, 2012.
- Godoy L.A., Buckling of oil storage steel tanks: Review of static buckling, *Thin-Walled Structures*, 103(1): 1-21, 2016.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons, 2002.
- Jaca, R.C., Calabró, H.D. y Espinosa, S.N., Influencia del nivel de fluido y viento en la respuesta estructural de un tanque de petróleo en situación de incendio. *Mecánica Computacional*, 34:163-180, 2016.
- Jaca, R.C., Espinosa, S.N. y Godoy, L.A., Comportamiento poscrítico de tanques de almacenamiento de combustibles sometidos a la acción de viento y fuego. *Mecánica Computacional*, 35: 2185-2201, 2017.
- Johnson, D.M., The potential for vapour cloud explosions - Lessons from the Buncefield accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23: 921-927, 2010.
- Liu, Y., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire. PhD Thesis. Institute for Infrastructure and Environment, The University of Edinburgh, Scotland, 2011.
- Mansour, K.A., Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks. PhD Thesis. Loughborough University, London, United Kingdom, 2012.
- Mishra, K., Wehrstedt, K., Krebs, H., Lessons learned from recent fuel storage fires. *Fuel Processing Technology* 107:166-172, 2013.

- Mudan, K.S., Croce, P.A., 1988. Fire Hazard Calculations for Large Open. *Hydrocarbon Fires*. In the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1995.
- Pritchard, M.J. and Binding, T. M., FIRE2: A New Approach for Predicting Thermal Radiation Levels from Hydrocarbon Pool Fires. *ICHEME Symposium*, 130:491-505, 1992.
- Reniers, G., Cozzani, V., *Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing*, Elsevier, 2013.
- Sengupta, A., Gupta, A.K., Mishra, I.M., Engineering layout of fuel tanks in a tank farm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24:568-574, 2011.
- 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.
- Thomas, P. H., The size of flames from natural fires, *9th Int. Combustion Symposium*, 844-859, 1963.