

TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE EXPUESTOS A FUEGO

Susana N. Espinosa^a y Rossana C. Jaca^a

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

Palabras Clave: fuego de estanque, almacenamiento de combustibles, modelado de transferencia de calor, efecto del viento sobre la llama, elementos finitos

Resumen. El almacenamiento de combustibles en las terminales de despacho se realiza en tanques dispuestos en baterías, separados entre sí por distancias reglamentarias. Cuando accidentalmente se origina un incendio en uno de los tanques, las deformaciones estructurales debidas a las altas temperaturas alcanzadas aumentan el riesgo de propagación a toda la planta. En este trabajo se analiza el efecto del fuego sobre el comportamiento térmico de tanques de almacenamiento de combustible y se determinan los perfiles de temperatura para volúmenes variables de líquido en los tanques. Adicionalmente se estudia el efecto del viento sobre la llama y su posterior incidencia sobre las máximas temperaturas alcanzadas en los tanques adyacentes. La determinación de los parámetros geométricos de la llama, su potencia emisiva y la radiación incidente sobre los tanques adyacentes, es realizada por medio de modelos de literatura contrastados experimentalmente. Los coeficientes de convección son introducidos en el modelo de forma rigurosa en función de las propiedades del fluido y de la temperatura de la superficie en los tanques. El modelo completo de transferencia de calor es implementado en Abaqus-Simulia (Dassault Systems, 2006) utilizando la técnica de elementos finitos. Los perfiles de temperatura encontrados en este estudio se aplican en un estudio posterior para determinar la deformación térmica-estructural de los tanques y evaluar las posibilidades de colapso y propagación del fuego.

1 INTRODUCCIÓN

La generación accidental de fuego en tanques de almacenamiento de combustible y su posible efecto sobre el comportamiento térmico-estructural de los tanques adyacentes es tema recurrente de investigación y análisis. La magnitud de tal efecto depende tanto de las propiedades físico-químicas del combustible almacenado como de parámetros geométricos, constructivos y ambientales. Si las distancias de separación entre tanques no son suficientes o se produce la explosión o colapso del tanque bajo fuego, la propagación de las llamas puede producirse rápidamente afectando a toda la planta. El riesgo de propagación aumenta en zonas geográficas con posibilidades de vientos intensos, incrementando la eficiencia de la combustión por efecto de un mayor ingreso de oxígeno con el aire y modificando la inclinación y extensión de la llama. Las consecuencias directas son un incremento de la temperatura de la llama y una disminución de la distancia efectiva entre llama y tanques.

La simulación numérica de este escenario requiere de un modelo para representar la llama y el efecto del viento sobre la misma. Uno de los modelos más utilizados se conoce como fuego de estanque o *pool fire*, y está caracterizado por una llama de difusión turbulenta controlada por fuerzas de empuje quemándose por encima de un estanque de combustible vaporizado con momento inicial despreciable (Rew et al., 1997). La estimación de la potencia emisiva de la llama se realiza considerando que el calor es radiado desde el centro de la llama (*point source model*) o bien, desde la superficie de un sólido cilíndrico (*solid flame model*) con una o dos zonas radiantes (modelo monocapa y bicapa, respectivamente). El modelo monocapa considera una potencia emisiva característica para toda la llama, mientras que el modelo bicapa considera una zona inferior de llama clara o visible y alta potencia emisiva y una zona superior con menor potencia emisiva debido a la formación de humo u hollín. Este último modelo reproduce con mayor exactitud el comportamiento del fuego observado experimentalmente en la combustión de hidrocarburos.

Existe en literatura una vasta investigación asociada a fuego de estanque. Rew et al. (1997) desarrollaron un modelo semi-empírico conocido como Poolfire6 Model, basado en el modelo de llama sólida y datos experimentales a escala completa y generando una base de datos de propiedades tales como velocidad de quemado del combustible y potencia emisiva para una amplia variedad de combustibles que abarcan desde gas natural licuado (LNG) y gas de petróleo licuado (LPG), hasta hidrocarburos pesados (hexano, heptano y petróleo crudo), gasolina, kerosene, diesel, metanol, y otros. La mayor parte de las correlaciones utilizadas en el presente trabajo para determinar la geometría y potencia emisiva de la llama fueron previamente validadas contra datos experimentales por Rew et al. (1997). Steinhaus et al. (2007) hicieron una extensa revisión de trabajos publicados entre 1947 y 2005 sobre *pool fires* a gran escala analizando el comportamiento de quemado de combustibles, la producción de hollín, la radiación emitida y la distribución del fuego, entre otros. Por su parte, el informe de McGrattan et al. (2000) presentó una metodología detallada de cálculo de la radiación emitida desde grandes *pool fires* utilizando el modelo de fuente puntual para combustibles gaseosos. Sengupta et al. (2011) modificaron el modelo de fuente puntual para tener en cuenta el efecto del viento sobre la altura de la llama y la distribución del fuego, y determinaron las distancias de separación segura entre tanques conteniendo combustibles volátiles e inflamables. El trabajo publicado por Yin Liu (2011) como resultado de su tesis doctoral analiza en profundidad diferentes casos de estudio, combinando el análisis térmico con el estructural y comparando la temperatura de falla del tanque objetivo para diferentes niveles de llenado de líquido y alturas de llama. Si bien no tiene en cuenta la posibilidad de viento y asume una temperatura constante arbitraria para toda la llama, el trabajo de Liu cubre los aspectos más relevantes del estudio de fuego en batería de tanques, constituyendo un excelente punto inicial

para estudios de mayor profundidad. En un trabajo más reciente, da Silva Santos y Landesmann (2014) publicaron un extenso y completo trabajo referido a las distancias mínimas seguras entre tanques, comparando la respuesta frente al fuego de tanques de concreto y acero, conteniendo gasolina o etanol y bajo la incidencia de vientos a velocidades de 18 km/h. Los resultados obtenidos para el comportamiento térmico del tanque objetivo se estimaron usando el método de elementos finitos mediante un modelo no estacionario implementado en ABAQUS y posteriormente validados con éxito frente a aquellos publicados en literatura obtenidos con modelos de fluidodinámica computacional (CFD).

En el presente trabajo se analiza el efecto del fuego sobre el comportamiento térmico de tanques de almacenamiento de combustible, tales como los ubicados en la Patagonia Argentina -donde los vientos promedio superan los 40 km/h-, bajo 2 escenarios posibles: llama radiando desde el tope del tanque fuente y llama al nivel del suelo. Estos 2 escenarios pueden ocurrir durante el mismo evento como resultado del colapso o explosión del tanque fuente (Figura 1).

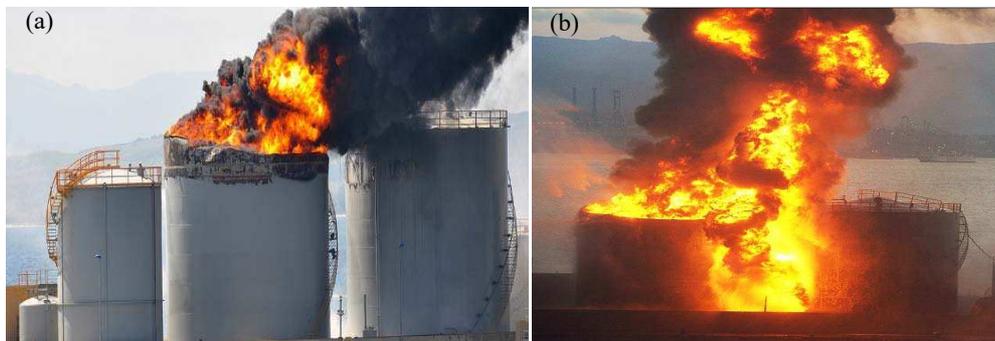


Figura 1: Incidente en el Puerto de Gibraltar, 31 de Mayo de 2011.
(a) Llama actuando desde el tope y (b) desde la base del tanque fuente.

2 MODELADO

La magnitud del efecto de la llama sobre los tanques adyacentes en una granja de tanques depende en líneas generales de parámetros geométricos asociados al fuego y a los tanques, materiales de construcción, tipo y volumen de combustibles almacenados, condiciones ambientales y del tiempo requerido para extinguir el incendio.

En este trabajo se analizan los casos de estudio más relevantes utilizando un modelo simple consistente de dos tanques idénticos separados un diámetro entre sí (entre caras externas), representando al tanque fuente donde se origina la llama (*source tank*) y al tanque objetivo (*target tank*) sobre el que incide la radiación. La llama se origina por combustión de gasolina desde la cara superior del tanque fuente o bien desde su base a nivel del suelo. El tanque objetivo está vacío o contiene volúmenes variables de gasolina. La incidencia del viento sobre la posición y geometría de la llama y su posterior efecto sobre las temperaturas de la superficie del tanque objetivo se comparan con aquellas resultantes de una llama radiando en ausencia de viento. La Tabla 1 resume los parámetros fijos supuestos en este estudio y los casos considerados, junto con la nomenclatura utilizada.

2.1 Modelado de la llama

La observación de incidentes reales y de laboratorio (Considine, 1984; Beyler, 1999; Mc Grattan et al., 2000; Mansour, 2012) muestra que la combustión de gases licuados origina una llama clara, sin presencia de humo, mientras que aquella proveniente de hidrocarburos

presenta dos zonas, una inferior de llama clara en la base del fuego y una zona superior de humo denso con porciones de llamas calientes emergiendo en forma intermitente.

Parámetros fijos	
Diámetro de tanques, D	11.44 m
Altura de tanques, H	11.44 m
Espesor	$6 \cdot 10^{-3}$ m
Distancia de separación (centro a centro), d	11.44 m
Temperatura ambiente, T_a	20°C
Humedad relativa ambiente, φ	40%
Combustible	gasolina
Tanques	acero, A36
Casos considerados	
Posición de la llama (relativa al tanque fuente)	Tope, Base
Velocidad del viento	$u_\infty = 0$ $u_\infty = 45$ km/h
Temperatura promedio del combustible en el tanque objetivo	20°C-80°C
Altura relativa de combustible en el tanque objetivo, h_{fuel}/H	0 0.5 0.94

Tabla 1: Parámetros fijados en el modelo y casos de estudio.

Los modelos de capa simple consideran una potencia emisiva promedio para toda la superficie de la llama de longitud L , siendo por tanto adecuados para representar la llama resultante de gases licuados. Sin embargo, cuando la llama proviene de hidrocarburos se obtienen mejores resultados por medio del modelo bicapa (Pritchard and Binding, 1992) al considerar una zona de llama inferior de longitud L_c , con potencia emisiva máxima E , y una zona superior con potencia emisiva promedio E_{av} y longitud $(L-L_c)$.

En este trabajo la representación física de la llama fue obtenida con el modelo de llama sólida bicapa, donde la llama es modelada como un cilindro elíptico vertical en ausencia de viento, o inclinado por efecto del viento sobre la misma, dividido en 2 zonas o capas que representan la llama clara inferior y la llama oscurecida por formación de humo en la parte superior. El diámetro de la llama se asume igual al del tanque fuente donde se origina la misma (*pool fire*) y el resto de los parámetros geométricos se obtienen a partir de modelos empíricos como función del diámetro de la llama, velocidad de combustión del combustible y velocidad del viento, entre otros.

La Figura 2 muestra los parámetros geométricos característicos de una llama inclinada por efecto del viento, donde se indica la altura, H , la longitud, L , el ángulo de inclinación medido desde la vertical, ϕ , el desplazamiento de la llama respecto de su base, ΔD , y la depresión de la llama desde el borde del tanque, H_s .

La altura de la llama sin viento (que coincide con su longitud para llama vertical) fue estimada con la correlación de Thomas (1963) en función del diámetro de la llama, D , y de la velocidad de combustión del combustible, m , obtenida en base a datos experimentales de Babrauskas (1983) para gasolina, como se presenta en la Ecuación (1).

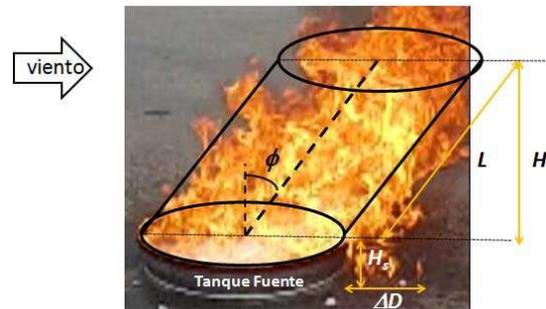


Figura 2: Parámetros característicos de la llama

$$\begin{aligned} H/D &= 42 (m^*)^{0.61} \\ m^* &= \frac{m}{\rho_o \sqrt{gD}} \\ m &= m_\infty (1 - \text{Exp}(-k\beta D)) \end{aligned} \quad (1)$$

donde ρ_o es la densidad del aire a temperatura ambiente, g es la gravedad estándar y las constantes m_∞ y $k\beta$ son $0.055 \text{ kg/m}^2\text{s}$ y 2.1 (Babrauskas, 1983), respectivamente.

La siguiente correlación (Thomas, 1963) fue utilizada para calcular la longitud de la llama inclinada, L , en función de las variables adimensionales, m^* y u^* , que tienen en cuenta la velocidad de combustión y la velocidad del viento, respectivamente:

$$\begin{aligned} L &= 55 D (m^*)^{2/3} (u^*)^{-0.21} \\ u^* &= \frac{u_\infty}{\left(\frac{g m D}{\rho_o} \right)^{1/3}} \end{aligned} \quad (2)$$

donde u_∞ representa la velocidad del viento medida a 9 m de altura.

La altura de la llama inclinada depende del ángulo de inclinación, ϕ , el que varía con la velocidad del viento de acuerdo a la Ecuación (3):

$$\begin{aligned} H/L &= \text{Cos}[\phi] \\ \text{Cos}[\phi] &= (u^*)^{-0.5} \end{aligned} \quad (3)$$

La longitud de la parte clara de la llama (zona inferior), L_c , se modifica con el tipo de combustible, el diámetro del estanque y la velocidad del viento. La producción de humo es directamente proporcional a la relación de átomos de carbono a átomos de hidrógeno en el combustible y aumenta con el diámetro del estanque debido a que se dificulta el ingreso de aire al centro del mismo, reduciendo la velocidad de combustión. El efecto contrario se

produce al aumentar la velocidad del viento. La correlación de Pritchard y Binding (1992) tiene en cuenta estos aspectos:

$$L_c/D = 11.404 (m^*)^{1.13} (u^*)^{0.179} \left(\frac{C}{H} \right)^{-2.49} \quad (4)$$

Por efecto del viento la llama se inclina y se extiende en la dirección del viento desplazándose respecto de su base y cayendo desde el borde superior del tanque. El desplazamiento, ΔD , y la caída o depresión de la llama, H_s , fueron evaluados con las expresiones recomendadas por la American Gas Association (Eq. (5), Sengupta, 2011).

$$\begin{aligned} \Delta D &= 28.68 D Re^{-0.25} Fr^{0.5} \\ H_s &= \Delta D / 3 \\ Re &= \frac{u_v D}{\nu}; \quad Fr = \frac{u_v^2}{gD} \end{aligned} \quad (5)$$

donde Re y Fr son los números adimensionales de Reynolds y Froude, respectivamente, y ν la viscosidad cinemática del aire, en m^2/s .

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos en esta sección:

Llama	$u_\infty = 0$	$u_\infty = 45 \text{ km/h}$
Altura, H [m]	17.5	3
Longitud total, L [m]	17.5	11
Longitud zona clara, L_c [m]	2.1	3.3
Inclinación, ϕ [grados]	0	68
Desplazamiento, ΔD [m]	-	7
Depresión, H_s [m]	-	3

Tabla 2: Parámetros geométricos de la llama, con y sin viento.

Una vez determinada la geometría de la llama, la radiación emitida desde su superficie fue obtenida por el modelo de Mudan y Croce (1996). El modelo bicapa considera una zona inferior donde la combustión es más eficiente y la potencia emisiva es máxima y una segunda zona caracterizada por una menor potencia emisiva debido a la presencia de humo u hollín. La máxima potencia emisiva depende del combustible y varía entre 120 kW/m^2 y 170 kW/m^2 para combustión de gasolina. 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. La Ecuaciones (6) y (7) fueron utilizadas para estimar la potencia emisiva de la llama clara y oscura, respectivamente, asumiendo un valor de $E_{max}=140 \text{ kW/m}^2$.

$$E = E_{\max} (1 - \text{Exp}[-100 D]) \quad (6)$$

$$E_{av} = E_{\max} \text{Exp}[-0.12 D] + E_{\text{hollin}} (1 - \text{Exp}[-0.12 D]) \quad (7)$$

2.3 Modelo de transferencia de calor

La llama fue considerada como un cuerpo negro de dimensiones geométricas dadas en la Tabla 2 según el caso. Para aire quieto ($u_{\infty} = 0$), la llama asciende verticalmente desde el techo del tanque fuente donde se origina el fuego. Para el caso de viento se analiza el peor escenario, en el que el viento inclina la llama en dirección al tanque objetivo, aumentando la radiación incidente sobre el mismo. En el análisis de transferencia de calor se tuvieron en cuenta las siguientes contribuciones para el tanque objetivo:

1. Conducción a través del acero.
2. Convección natural y forzada según el caso.
3. Intercambio de radiación entre llama-tanque-ambiente.
4. Radiación interna a través del aire interno (se consideró que la gasolina líquida es opaca a la radiación y que el aire interno tiene transmisividad unitaria).

Las propiedades del acero, aire y gasolina se computaron en función de la temperatura. Los coeficientes de convección fueron introducidos en el modelo de forma rigurosa en función de las propiedades del fluido y de la temperatura de la superficie en los tanques. Los coeficientes de convección para aire y gasolina en el interior del tanque y para aire externo quieto se estimaron considerando convección natural con la correlación de Churchill y Chu (Incropera-DeWitt, 2002) para placas verticales de altura H , la que puede ser aplicada a cilindros verticales siempre que la altura de la capa límite térmica sea mucho menor que el diámetro del cilindro (Incropera-DeWitt, 2002).

$$\overline{Nu}_H = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_H^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} J^{8/27}]^{1/4}} \right\}^2 \quad (8)$$

$$Ra_H = g\beta(T_s - T_{\infty})H^3 / (\nu \alpha)$$

$$Pr = \nu / \alpha$$

$$\alpha = K / (\rho \cdot c_p)$$

$$h = \overline{Nu}_H K / H$$

donde h es el coeficiente de película, \overline{Nu}_H , Ra_H y Pr son los números adimensionales Nusselt (promedio), Rayleigh y Prandtl, respectivamente, calculados en función de las propiedades del fluido: coeficiente de expansión térmica, β , conductividad térmica, K , viscosidad, ν , densidad, ρ y calor específico a presión constante, c_p . Las propiedades del fluido se computan a la temperatura de la película $T_{film} = \frac{T_s + T_{\infty}}{2}$, siendo T_s la temperatura de la superficie y T_{∞} la temperatura del fluido. Debido a que la temperatura de la superficie del tanque objetivo es desconocida, el cálculo del coeficiente de película se realizó en forma iterativa, tomando una temperatura T_s promedio.

Para tanque objetivo sometido a viento, el coeficiente de película externo puede ser determinado en base a diferentes correlaciones válidas para convección forzada y flujo cruzado alrededor de cilindros de diámetro D . Sin embargo, la mayor parte de ellas requieren

de un cálculo iterativo debido a que las propiedades se evalúan a la temperatura de la película. En el presente análisis se optó por utilizar la correlación de Zhukaukas (Incropera-DeWitt, 2002) dada por la ecuación (9) debido a que todas las propiedades se evalúan a la temperatura del fluido, T_∞ , excepto Pr_s , que es evaluado a la temperatura T_s .

$$\begin{aligned}\overline{Nu}_D &= 0.076 Re^{0.7} Pr^{0.37} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \\ Re_D &= \frac{u_\infty D}{\nu} \\ h &= \overline{Nu}_D K / D\end{aligned}\tag{9}$$

La radiación incidente sobre los tanques adyacentes se estima afectando a la potencia emisiva proveniente de la llama, E , por la emisividad de la superficie del tanque, ε , el factor de visión, F_{ij} , que considera la geometría y posición relativa de los tanques y la transmisividad atmosférica, τ , que tiene en cuenta la atenuación de la radiación por efecto del vapor de agua y del CO_2 presentes en el aire atmosférico. En la Ecuación (10), q'' y E tienen unidades de energía por unidad de superficie.

$$q''_{RAD,flame} = \varepsilon \tau F_{ij} E\tag{10}$$

Las emisividades del acero A36 tabuladas en literatura varían entre 0.3 y 0.8, para superficies no oxidadas y oxidadas, respectivamente. En nuestros cálculos asumimos una emisividad de 0.8 para la superficie externa de los tanques adyacentes, considerando que el acero en contacto con las llamas se tizna y probablemente se oxida. Esto no ocurre con la superficie interna, para la cual se utilizó una emisividad de 0.3.

La transmisividad atmosférica fue estimada por el Método de Wayne (Eq. 11) en función de la humedad relativa del ambiente, ϕ , la temperatura ambiente T_a , en K, y la presión de saturación del agua en mm de Hg a dicha temperatura, $P_{sat}(T_a)$.

$$\begin{aligned}\tau &= 1.006 - 0.01171 \text{Log} X_{H_2O} - 0.02368 (\text{Log} X_{H_2O})^2 - 0.03188 \text{Log} X_{CO_2} + 0.00164 (\text{Log} X_{CO_2})^2 \\ X_{H_2O} &= (2.8865110^2 \phi d P_{sat}(T_a)) / T_a \\ X_{CO_2} &= 273 d / T_a\end{aligned}\tag{11}$$

El intercambio de radiación entre la llama y el tanque es función directa de los factores de forma o visión, los que tienen en cuenta la geometría y posición de los objetos intervinientes para estimar el flujo de radiación neto entre ellos. El aire es transparente a la radiación, lo que implica que no interfiere con la misma actuando de manera efectiva como el vacío. Por el contrario, los líquidos son opacos a la radiación, de modo que el intercambio de energía radiante entre el techo y las paredes internas del tanque variará según se encuentre vacío (lleno de aire) o contenga diferentes niveles de combustible líquido.

En todos los escenarios analizados en el presente trabajo se supuso constante la temperatura del aire dentro del tanque, e igual a la temperatura atmosférica, T_a . En cuanto al combustible líquido, se consideró una variación de su temperatura promedio entre 20°C y 80°C, de acuerdo al tiempo de exposición al fuego y la posibilidad de que los tanques contengan agua en su interior.

2.4 Modelo computacional

Las temperaturas máximas alcanzadas en el tanque objetivo, con y sin viento y las deformaciones provocadas en el material por cargas térmicas, de viento e hidrostáticas, fueron estimadas por elementos finitos utilizando la herramienta computacional ABAQUS-Simulia (Dassault Systems, 2006). El análisis se realizó en forma secuencial, evaluando en un primer paso el efecto térmico de la llama sobre el tanque y utilizando estos resultados para determinar las consecuencias sobre su estructura. El análisis térmico se realizó utilizando elementos de transferencia de calor cuadráticos y triangulares de 6 y 8 nodos (DS6 y DS8), respectivamente.

La Figura 3 muestra el modelo completo implementado en Abaqus, consistente de dos tanques idénticos separados un diámetro entre sí, representando al tanque donde se origina la llama (tanque fuente) y al tanque sobre el que incide la radiación (tanque objetivo). El tanque objetivo está vacío o contiene diferentes niveles de gasolina (ver Tabla 1). La incidencia del viento sobre la posición y geometría de la llama y su posterior efecto termo-estructural se compara con aquellas resultantes de una llama radiando en ausencia de viento. En este último caso la llama asciende verticalmente ($u_\infty = 0$) desde el techo del tanque fuente o desde su base. Para el caso de viento se analizó el peor escenario, en el que el viento inclina la llama en dirección al tanque objetivo. En total se computaron 12 casos que contemplan 3 niveles diferentes de combustible almacenado, 2 posiciones diferentes de la llama en el tanque fuente y llama vertical o inclinada por el viento.

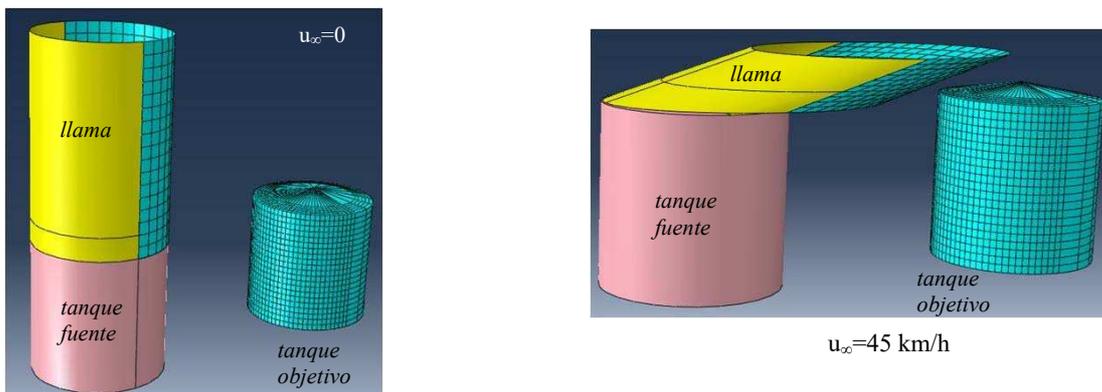


Figura 3: Modelo computacional

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 condensa los 12 casos analizados en este trabajo mostrando el efecto térmico sobre la superficie lateral y el techo de un tanque afectado por la radiación emitida por la llama. La distribución de temperaturas surge del balance de energía sobre los tanques adyacentes al tanque bajo fuego, resultante de la transferencia de calor neta de radiación incidente sobre el tanque objetivo, conducción a través de las paredes y techo, convección entre las superficies y el fluido en contacto con ellas, e intercambio de radiación dentro del tanque a través del aire interior. A efectos de comparar cualitativamente la distribución de temperatura para los casos mostrados en la Figura 4, se fijaron los mismos límites máximos y mínimos de temperatura. Las máximas temperaturas (color rojo) se registran en la mitad superior de la pared lateral y el techo cuando la llama se produce a nivel del suelo bajo condiciones de viento (caso D). El viento modifica la geometría de la llama y la posición relativa entre llama y tanque, afectando la magnitud de la radiación neta incidente sobre el tanque objetivo (q'' , J/m^2). Lo mismo sucede cuando la llama originada inicialmente en el

techo del tanque fuente se extiende ardiendo desde su base, pero en este caso el incremento de radiación se debe a un aumento del área de la superficie radiante. Adicionalmente, el viento aumenta el coeficiente de convección (convección forzada) respecto al de convección natural o libre correspondiente a aire quieto. Por otro lado, el coeficiente de convección es superior para líquidos que para gases, con lo que la distribución de temperaturas del tanque vacío difiere marcadamente de la de un tanque conteniendo algún nivel de combustible en su interior. Aún cuando consideremos un tanque lleno de combustible, habrá también un espacio de aire entre el combustible y el techo. Cuando se comparan, por ejemplo, los casos AI, AII y AIII de la Figura 4, se observa una distribución de temperaturas idéntica en las superficies del tanque en contacto con el aire interior para los tres casos, pero se modifica en la superficie en contacto con el líquido. Como consecuencia, la interface gas-líquido en el interior del tanque se ve “reflejada” en la distribución de temperaturas sobre su superficie, lo que se aprecia también en los casos B, C y D de la Figura 4.

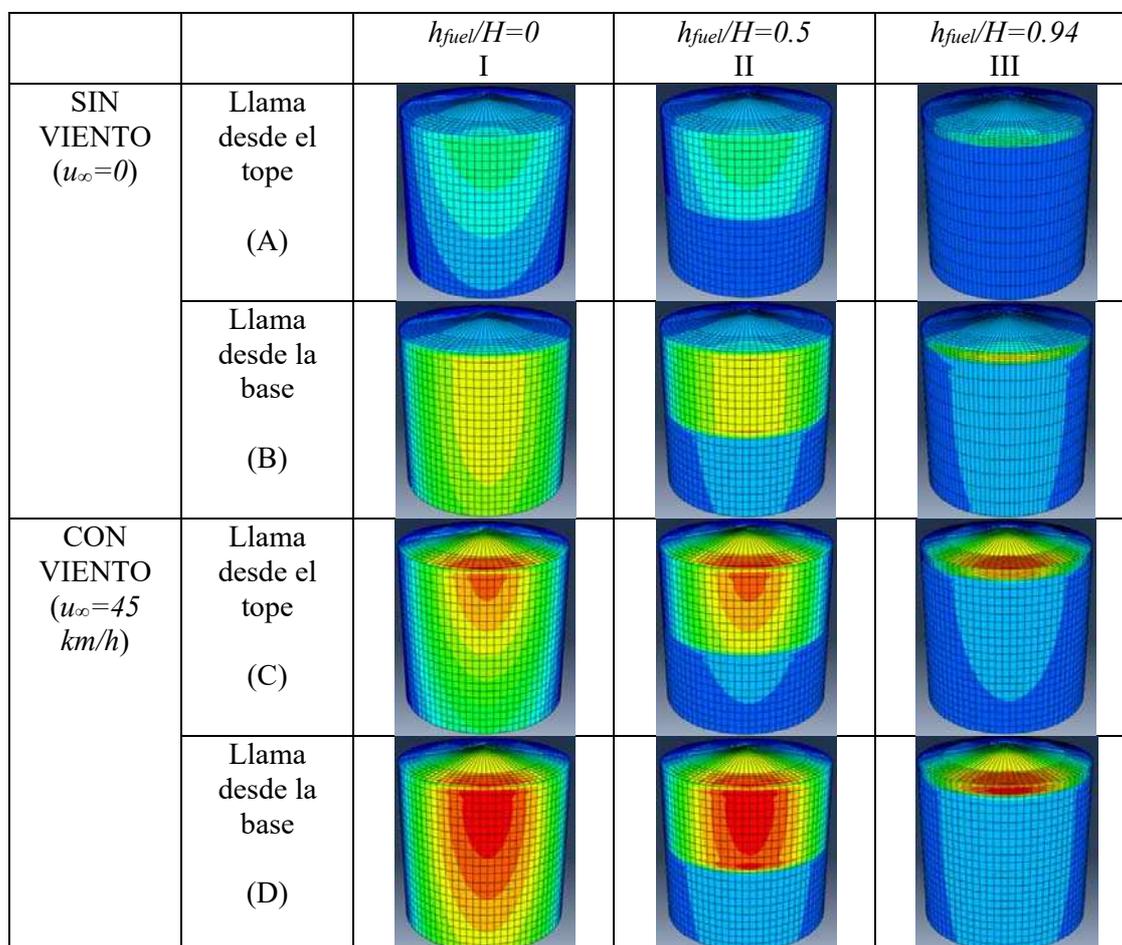


Figura 4: Distribución de temperaturas en la superficie del tanque objetivo enfrentada a la llama para los 12 escenarios considerados. Las zonas de temperatura máxima se indican en rojo y las de mínima en azul.

Los perfiles de temperaturas medidos sobre la coordenada vertical del tanque objetivo, bajo viento, se comparan en la Figura 5 para 3 niveles de combustible en su interior. Las temperaturas son computadas en la superficie del tanque objetivo enfrentada a la llama

inclinada por el viento y actuando desde el tope del tanque fuente (casos CI, CII y CIII de la Figura 4). La escala vertical (h) relativa a la altura del tanque (H) se extiende para considerar también la distribución de temperaturas en el techo ($h/H > 1$). Los resultados muestran un aumento continuo de la temperatura desde la base hasta el borde superior del tanque cuando este se encuentra vacío, en tanto que si contiene combustible la temperatura permanece prácticamente invariable desde la base hasta el nivel del líquido, a partir del cual se incrementa marcadamente siguiendo el perfil de temperaturas del tanque vacío. Este comportamiento se justifica por el efecto refrigerante del líquido sobre la superficie en contacto con el mismo, debido a que el coeficiente de convección promedio del combustible líquido es 2 órdenes de magnitud superior al del aire y el líquido es opaco a la radiación. En el borde superior del cilindro la temperatura cae bruscamente como consecuencia de la reducción del factor de visión (ver Eq. 10) y posteriormente aumenta en el techo por efecto de la inclinación de la llama sobre el tanque. Las superficies en contacto con el aire interno presentan un comportamiento térmico idéntico, de modo que las variaciones de temperatura de la Figura 5 permiten predecir el perfil de temperaturas para cualquier otro nivel de combustible en el tanque. Las temperaturas sobre la coordenada vertical permanecerán aproximadamente constantes desde la base del tanque hasta el nivel del líquido y posteriormente variarán siguiendo el comportamiento del tanque vacío.

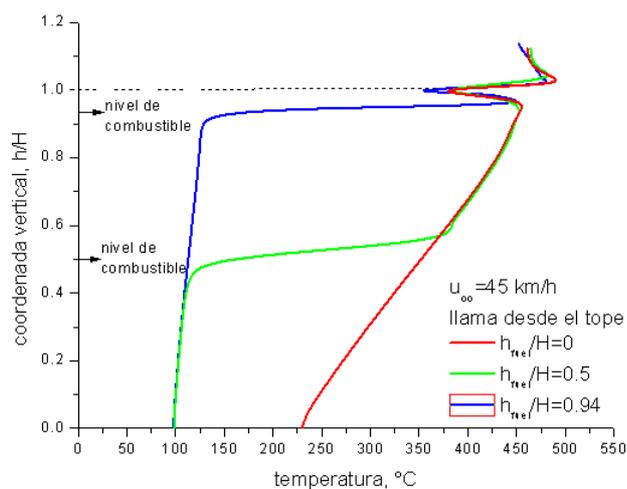


Figura 5: Perfiles de temperaturas sobre la coordenada vertical enfrentada a la llama para tanque vacío o conteniendo combustible. La llama está radiando bajo condiciones de viento desde el tope del tanque fuente.

La Figura 6 permite contrastar el efecto del viento y de la posición de la llama sobre los perfiles de temperatura. Las menores temperaturas se presentan cuando una llama vertical actúa desde el tope del tanque fuente (caso a). Si eventualmente la llama se extendiera hasta cubrir por completo el tanque fuente (caso b), la radiación incidente sobre el tanque objetivo sería de mayor magnitud que en el caso a) desplazando los perfiles del lateral superior y el techo hacia mayores temperaturas. Adicionalmente, una llama actuando a nivel del suelo incrementa el factor de visión en la región inferior del tanque objetivo aumentando las temperaturas en dicha zona. En los casos a) y b) el efecto térmico de una llama vertical se da principalmente en la pared lateral del tanque sin afectar significativamente el techo. En contraste, cuando la llama se inclina en dirección al tanque objetivo por efecto del viento (casos c y d), se reduce la distancia entre ellos y aumenta la radiación incidente sobre el

lateral superior y también sobre el techo. Nuevamente en el caso d) se observan mayores temperaturas que en c) debido a que la llama se extiende hasta la base del tanque fuente incrementando su superficie radiactiva.

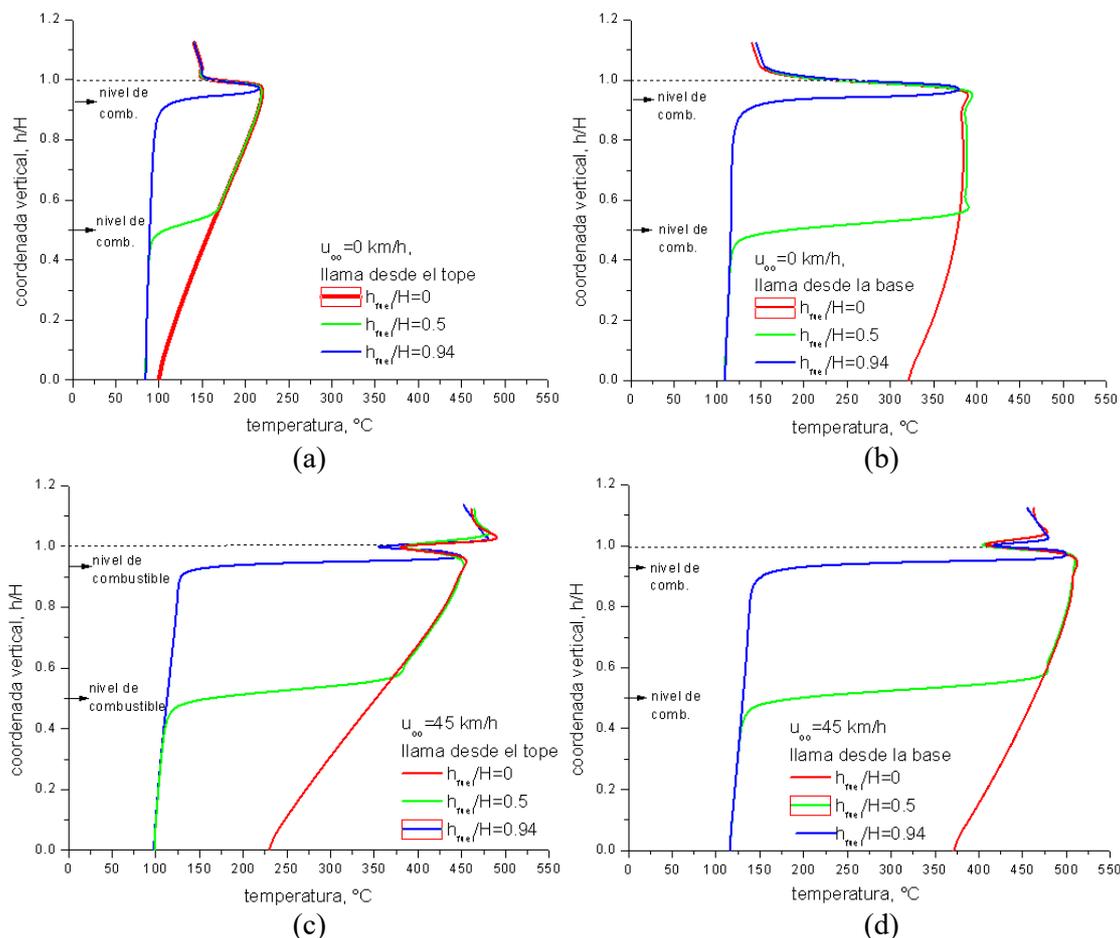


Figura 6: Perfiles de temperatura sobre la coordenada vertical para 3 niveles de combustible almacenado en el tanque objetivo. Llama vertical (a y b) o inclinada por el viento (c y d), actuando desde el tope del tanque fuente (a y c) o desde su base (b y d).

Las temperaturas computadas siguiendo la circunferencia del tanque presentan un comportamiento sinusoidal como se muestra en la Figura 7, con temperaturas máximas en la superficie del tanque enfrentada a la llama y temperaturas mínimas en la región posterior del tanque objetivo. Los perfiles de temperatura se computaron a diferentes alturas sobre la superficie lateral del tanque para un tanque vacío. Si el tanque contiene combustible hasta la mitad de su altura, las 4 alturas relativas seleccionadas corresponden a la zona en contacto con el aire, y por lo tanto, los perfiles son idénticos que para el tanque vacío. Lo mismo ocurre para $h/H=1$ si el tanque está lleno, pero en este caso la temperatura permanecerá prácticamente invariable para alturas relativas inferiores a 0.94. Como se vio en los gráficos anteriores, las temperaturas se incrementan significativamente en la región frontal cuando la llama es afectada por viento.

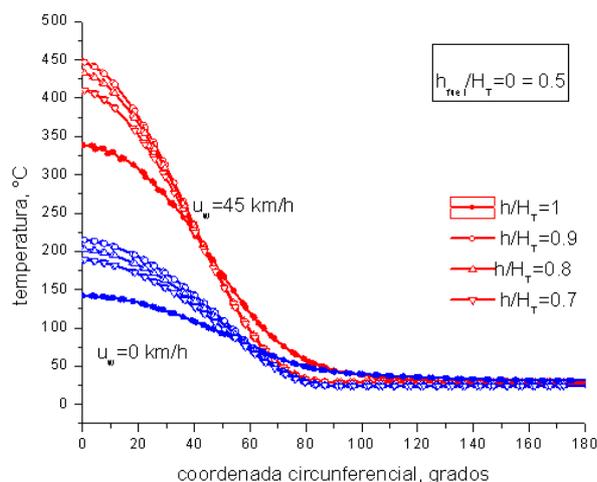


Figura 7: Efecto del viento sobre la temperatura circunferencial medida a 4 alturas de un tanque vacío o con combustible hasta la mitad de su altura y llama actuando desde el tope.

Finalmente, se analiza el efecto de la temperatura del combustible sobre la distribución de temperaturas en la superficie del tanque. La Figura 8a compara los perfiles de temperatura computados en tiempos diferentes a partir del inicio del fuego. Inicialmente el combustible se encuentra a temperatura ambiente y el perfil de temperaturas corresponde a la línea discontinua, pero una exposición prolongada a la llama hará que el combustible aumente su temperatura, produciendo un desplazamiento del perfil de temperaturas en la mitad inferior del tanque hasta la línea continua, mientras que permanece invariable en la zona de contacto con el aire. Por otra parte, la Figura 8b contrasta resultados cuando la llama se extiende desde el tope hasta la base del tanque fuente. El aumento de la radiación emitida por la llama afecta marcadamente la temperatura de la zona del tanque en contacto con el aire interior, en tanto que el líquido interior actúa amortiguando dicho efecto, con lo que las temperaturas son prácticamente invariables en la zona inferior del tanque. El mismo comportamiento se verificará para cualquier otro nivel de combustible almacenado.

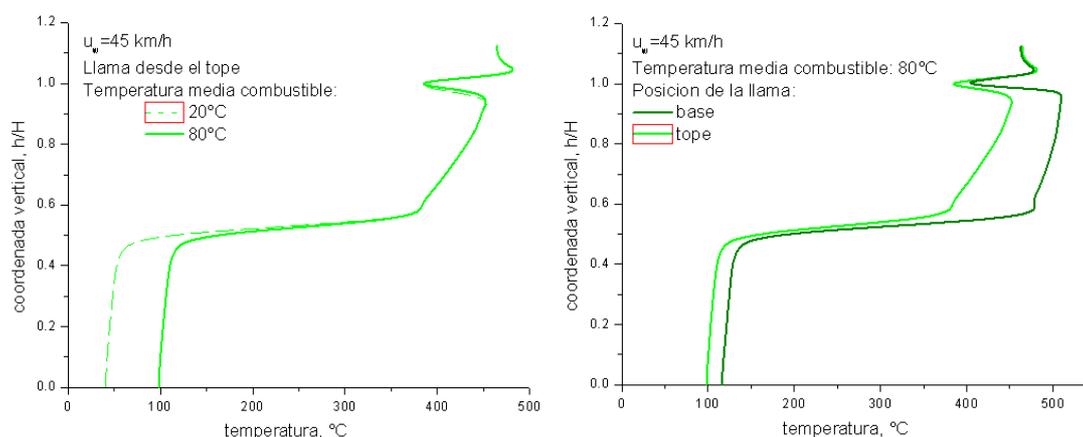


Figura 8: Efecto de la temperatura promedio del combustible (a) y la posición de la llama (b) sobre la temperatura de la superficie de un tanque conteniendo combustible hasta la mitad de su altura.

4 CONCLUSIONES

Se analizaron diferentes escenarios de fuego que podrían estar presentes en forma simultánea en un incidente real de una batería de tanques de almacenamiento de combustible.

La distribución de temperaturas sobre un tanque adyacente a la llama se determinó por medio de un riguroso balance de energía considerando la potencia emitida por una llama proveniente de la combustión de gasolina y tanques de techo cónico separados un diámetro entre sí. Los resultados del efecto térmico fueron computados por elementos finitos.

Temperaturas del orden de 500°C se establecen en la superficie lateral y el techo cuando la llama se extiende desde el nivel del suelo y se inclina en dirección al tanque objetivo por efecto del viento. En contraste, las menores temperaturas se verifican cuando la llama es vertical y se origina en el tope del tanque fuente. El combustible actúa como refrigerante reduciendo la temperatura de las superficies en contacto con el líquido. Sin embargo, cualquiera sea el nivel de combustible almacenado, el perfil de temperaturas permanece invariable en las superficies del tanque en contacto con el aire interior.

Los valores de temperatura computados fueron utilizados en un trabajo posterior para determinar las temperaturas críticas de pandeo de los tanques.

REFERENCIAS

- Abaqus. Simulia. Unified FEA. Dassault Systems. Warwick, Rhode Island. USA, 2006
- Babrauskas, V., Estimating Large Pool Fire Burning Rates. *Fire Technology*, 19:251-261, 1983.
- Beyler, C.L., Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2002.
- Calabró, H.D., Jaca, R.C., Espinosa, S. N., Influencia del nivel de fluido y viento en la respuesta estructural de un tanque de petróleo en situación de incendio. Enviado a Enief 2016. En proceso de revisión.
- Considine, M., Thermal Radiation Hazard Ranges from Large Hydrocarbon Pool Fires. *Safety & Reliability Directorate*, UK Atomic Energy Authority, 1984.
- 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.
- Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons, 2002.
- 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.
- McGrattan, K.B., Baum, H.R., Hamins, A., Thermal radiation from large pool fires. Nistir 6546. *National Institute of Standards and Technology*, 2000.
- Mudan, K.S. and 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. *ICChemE Symposium*, 130:491-505, 1992.
- Rew, P.J., Hulbert, W.G., Deaves, D.M., Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires. *Trans IChemE*, 75:81-89, 1997.
- 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.
- Steinhaus, T., Welch, S., Carvel, R.O., Torero, J.L., Large-scale pool fires. *Thermal Science*,

11:101-118, 2007.

Thomas, P. H., The size of flames from natural fires, *9th Int. Combustion Symposium*, 844-859, 1963.