

## MODELACIÓN ACOPLADA VERSUS DESACOPLADA DE SISTEMAS LLAMA/ESTRUCTURA EN PANDEO TÉRMICO DE TANQUES DE PETRÓLEO

### COUPLED VERSUS UNCOUPLED MODELS OF FLAME/STRUCTURE SYSTEMS IN THERMAL BUCKLING OF OIL TANKS

Horacio D. Calabro<sup>a</sup>, Rossana C. Jaca<sup>a</sup> y Luis A. Godoy<sup>b</sup>

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

<sup>b</sup> Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), CONICET y Universidad  
Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina, [luis.godoy@unc.edu.ar](mailto:luis.godoy@unc.edu.ar)

**Palabras clave:** fuego, modelos simplificados, tanques, temperatura, transferencia de calor.

**Resumen.** Las consecuencias de incendios en plantas de petróleo en general afectan la funcionalidad de tanques y pueden producir fallas estructurales, con serio riesgo de contaminación ambiental y pérdida de infraestructura. Para evaluar la respuesta de los tanques, es imprescindible estimar la distribución de temperaturas que llegan al tanque objetivo. En general, existen dos enfoques que difieren en su nivel de detalle: el efecto térmico representado mediante modelos aproximados (independientes de la fuente que genera la acción térmica) o por modelos acoplados (que incluyen tanto la fuente como el tanque estudiado). La mayoría de los autores emplean la versión simplificada. En este trabajo se comparan ambos enfoques, a fin de estimar los errores que se cometen al usar un modelo aproximado. Para el modelo acoplado se incluyen como variables la distancia entre tanques, el nivel de fluido en el interior del tanque objetivo, y la inclinación de la llama por viento. Se modela un tanque de techo cónico mediante elementos finitos y se analiza el pandeo térmico a través de un análisis de bifurcación lineal, identificando la carga crítica de pandeo y su modo asociado como elementos para realizar la comparación. Este trabajo pretende identificar limitaciones de los modelos simplificados para la carga térmica frente a los modelos más detallados.

**Keywords:** fire, heat transfer, tanks, temperature, simplified models.

**Abstract.** The consequences of fires in oil plants in general affect the functionality of tanks and can cause structural failures, with a serious risk of environmental contamination and loss of infrastructure. To evaluate the response of the tanks, it is essential to estimate the temperature distribution on the target tank. In general, there are two approaches that differ in their level of detail: the thermal effect represented by approximate models (independent of the source that causes the thermal action) or by coupled models (that include both the source and the tank studied). Most authors use the simplified version. In this paper, both approaches are compared, in order to estimate the errors that are made when using an approximate model. For the coupled model, the distance between tanks, the fluid level inside the target tank, and the inclination of the flame due to wind are included as variables. A conical roof tank is modeled using finite elements and thermal buckling is analyzed through linear bifurcation analysis, to identify the critical buckling load and its associated mode as elements for comparison. This paper attempts to identify limitations of the simplified models for the thermal load compared to the more detailed models.

## 1 INTRODUCCION

Las compañías de ingeniería que desarrollan proyectos de diseño de plantas de tratamiento de hidrocarburo deben definir la ubicación y disposición de cada equipo según el requerimiento del proceso. En particular los tanques de almacenamiento pueden tener distintas características geométricas y disponerse según separaciones establecidas en las normas y características particulares de cada planta, pero estas recomendaciones no incluyen la acción térmica sobre un tanque determinado. Es por esto que frente a la acción térmica originada en un tanque fuente se deben tener en cuenta otras variables que influyen sobre la respuesta de un tanque objetivo. Adicionalmente, se deben considerar otros factores que modifican el comportamiento estructural del tanque objetivo, como el tipo de fluido que se quema, el nivel de fluido almacenado en el interior del tanque objetivo, la localización de la llama en el tanque fuente y la inclinación de la llama por la velocidad del viento.

En los últimos años se han realizado estudios de pandeo térmico de tanques debido a efectos de una llama adyacente (Godoy et al. 2022). Dos enfoques son los más comunes: uno incluye el estudio detallado de transferencia de calor de la fuente hacia el tanque objetivo, en el que se determinan las temperaturas que llegan en base a características de la llama.

La distribución de temperaturas generada sobre un tanque proveniente de otro tanque con fuego fue estudiada por varios autores mediante análisis de transferencia de calor (Liu 2011, Da Silva y Landesmann 2014, Espinosa et al. 2018, 2019, Pantousa 2019). En algunos casos, Liu (2011), Liu et al. 2012, Jaca et al. (2016), Jaca et al. (2018), Jaca et al. (2020), realizaron estudios numéricos de pandeo térmico para evaluar el comportamiento estructural mediante un enfoque secuencial.

El otro enfoque es el de usar modelos simplificados, en los que se supone una distribución de temperaturas que se escala hasta alcanzar una temperatura crítica. Modelos térmicos simplificados fueron usados por Liu (2011), Godoy y Batista-Abreu (2012), Batista-Abreu y Godoy (2013), Calabró et al. (2013), Calabró et al. (2014), Burgos et al. (2015), Maraveas (2014), Pantousa et al. (2018), Pantousa y Godoy (2019).

Este trabajo compara ambos enfoques, e ilustra el nivel de error que puede cometerse en el uso de modelos simplificados al no tener en cuenta detalles del modelo de la fuente térmica.

## 2 CASO DE ESTUDIO

En este trabajo se analiza la respuesta estructural de un tanque de almacenamiento de hidrocarburo afectado por una carga térmica originada en un tanque vecino (fuente). El tanque en estudio tiene una altura y diámetro de 11.44m, presenta en la parte superior un techo cónico de altura 1.24m. El espesor considerado es de  $t = 0.0064\text{m}$  (1/4") calculado por el método de un pie (Calabró et al. 2013)), establecido en la norma API 650. El espesor del techo cónico es considerado a través de una sección equivalente (Burgos et al. 2015) para contemplar el sistema de vigas estructurales internas. La estructura se encuentra simplemente apoyada sobre el sistema de fundación. El acero utilizado es el A36 con un módulo de Poisson de 0.3, módulo de elasticidad  $E=201\text{MPa}$ , y coeficiente de dilatación  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$  a  $20^\circ\text{C}$ .

La carga térmica utilizada se determinó a través de un estudio de transferencia de calor (Espinosa et al. 2019, Jaca et al. 2020) analizando tres parámetros: la variación de nivel de combustible interior en el tanque que recibe la carga térmica, la separación entre el tanque que provoca la carga térmica (CT) por fuego y el tanque de estudio (objetivo) y el efecto de la variación de la inclinación de la llama debida a la variación de la velocidad del viento. Los casos analizados se muestran en la Tabla 1, resaltando el caso de comparación, tanque en condición vacío, sin viento y a un diámetro de separación (TK-1D-V). En las tablas 2, 3, 4, 5 y 6 se resalta la  $T_{\text{max}}$  obtenida por transferencia térmica correspondiente al caso de comparación.

Inclinación de llama por viento		Separación entre tanques		Nivel de fluido	
$\theta=0^\circ$	<b>Tk-1D-V</b>	1 D	<b>Tk-1D-V</b>	Vacío	<b>Tk-1D-V</b>
$\theta=30^\circ$	Tk-1D-V-30	0.33D	Tk-R-V	Medio	Tk-1D-M
$\theta=45^\circ$	Tk-1D-V-45	1.5 D	Tk-1.5D-V	Lleno	Tk-1D-LI
$\theta=60^\circ$	Tk-1D-V-60	2 D	Tk-2D-V		
$\theta=68^\circ$	Tk-1D-V-68				

Tabla 1: Nomenclatura de casos considerados adoptada en este trabajo

Para el caso de los niveles de fluido se analizaron tres escenarios: tanque vacío, lleno hasta la mitad de su capacidad y completamente lleno de fluido. Para distancias variables entre tanques se consideró la separación de 0.33 diámetros (distancia reglamentaria), 1 diámetro, 1.5 diámetros, y 2 diámetros. Finalmente, las inclinaciones de la llama producida por la velocidad del viento tenidas en cuenta son 0 grados, 30 grados, 45 grados, 60 grados y 68 grados. En la Figura 1 se muestran los casos de estudio.

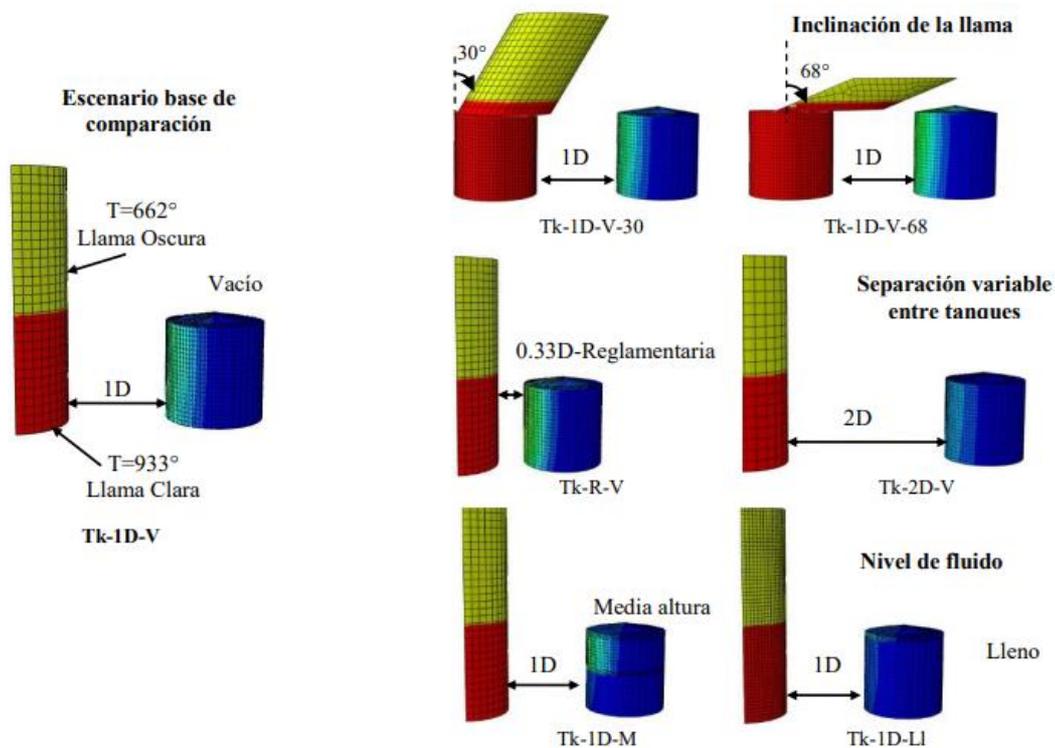


Figura 1. Casos de transferencia térmica estudiados

Por otra parte, se consideró una carga térmica para realizar un análisis simplificado que presenta una variación del tipo  $\cos^2\theta$  en coordenadas cilíndricas (inicialmente propuesta por Liu, 2011), solo en la zona del casco cilíndrico. Se tomó el tanque de estudio en condición vacío, sin viento y a un diámetro de separación (TK-1D-V), buscando modelos simplificados a los analizados anteriormente, que permitan realizar estudios sin contar con los resultados de transferencia de calor. Para esto se realizan parametrizaciones de la distribución  $\cos^2\theta$  en función del máximo y promedio de los valores extremos más cargado térmicamente, encontrados por el análisis de transferencia de calor.

### 3 ESTADOS DE CARGA

Para estos análisis solo se considera como estado de carga el campo térmico, dado inicialmente por el análisis de transferencia de calor desde otro tanque vecino en estado de incendio. En la Figura 2 se muestra el campo térmico utilizado en cada caso mencionado.

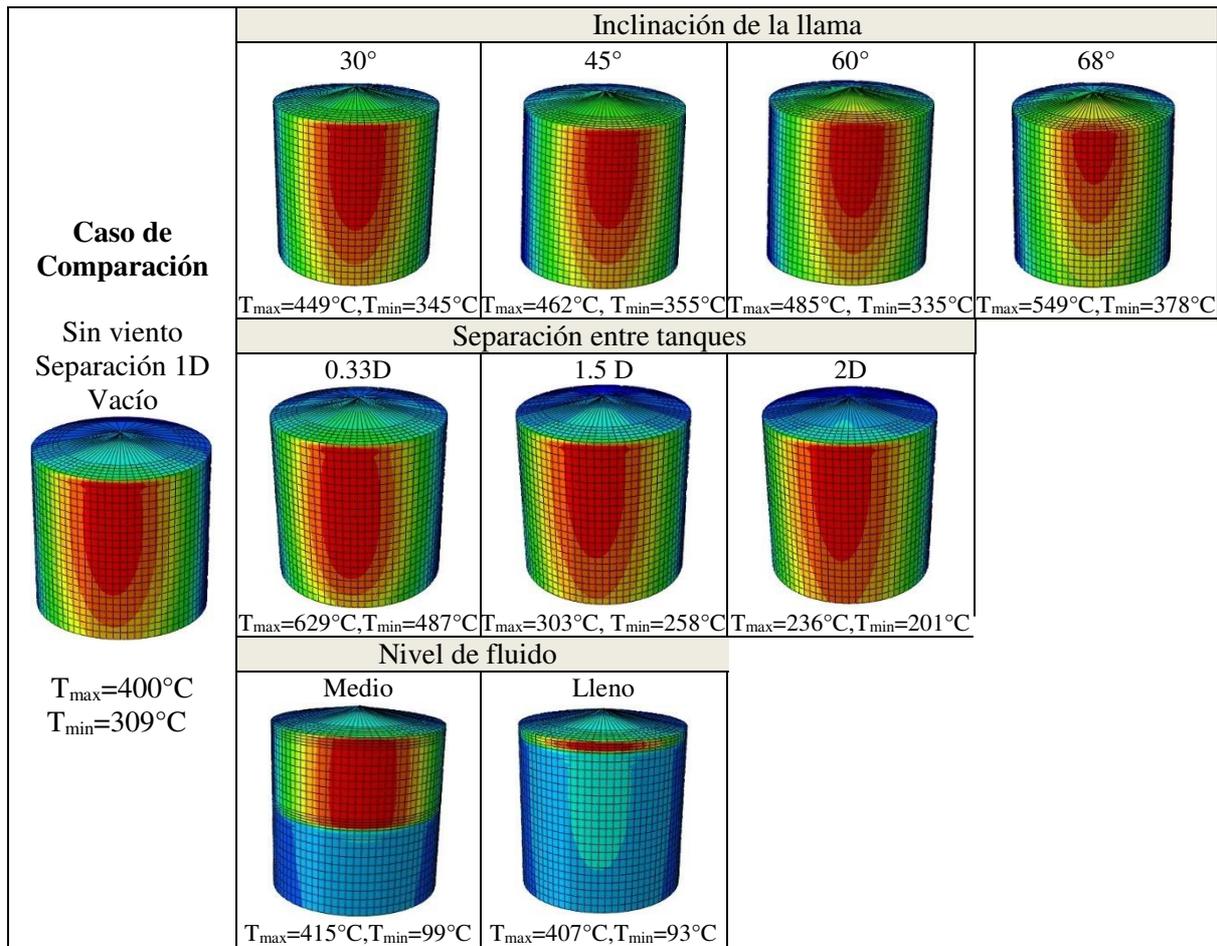


Figura 2: Distribución de temperaturas en la superficie del tanque objetivo, para los diez escenarios considerados. Las zonas de temperatura máxima se indican en rojo y las de mínima en azul.

Para realizar análisis simplificados se utiliza una distribución aproximada de la temperatura. En la Ecuación 1 se muestra la distribución  $\cos^2\theta$  utilizada para el tanque vacío, a un diámetro de distancia y sin viento, el cual será usado como caso de comparación. En la Figura 3 se muestra la variación radial de la carga térmica, que es máxima con un valor unitario en  $\theta=0^{\circ}$  y vale cero en  $\theta=\pi/2$  y  $3\pi/2$ .

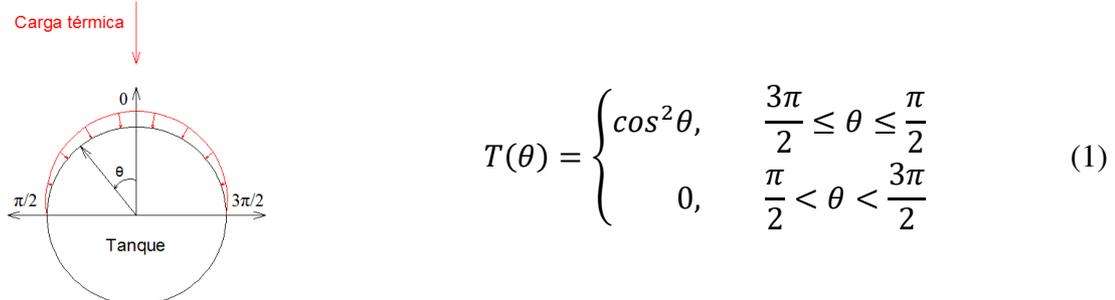


Figura 3: Distribución de la CT Aprox

Para realizar el análisis simplificado con la distribución  $\cos^2\theta$  se propone parametrizar la carga térmica simplificada considerando el caso de comparación TK-1D-V como valor de la unidad. Se siguen dos criterios para determinar el coeficiente de parametrización que se antepone a la expresión de  $\cos^2\theta$ , en el Caso 1 se realiza el cociente entre el máximo valor de

la distribución térmica determinada por el análisis de transferencia de calor para el caso que se esté estudiando y la máxima temperatura encontrada en el campo térmico para el caso de comparación TK-1D-V. El segundo criterio (Caso 2) consiste en realizar el cociente entre el promedio de las temperaturas extremas, en la cara más cargada térmicamente y la máxima temperatura encontrada en el campo térmico para el caso de comparación TK-1D-V. en la Figura 4 se muestran las distribuciones térmicas usadas en los análisis.

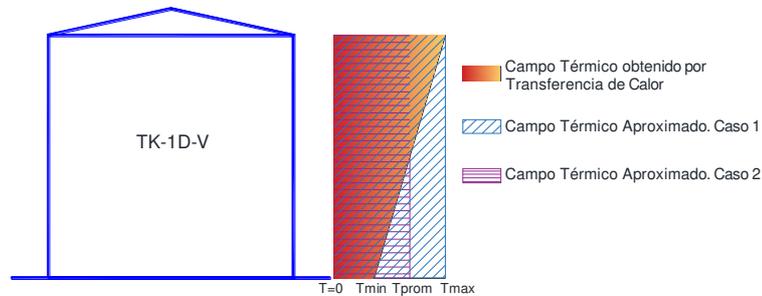


Figura 4: Distribuciones térmicas usadas en los análisis de pandeo

En la Tabla 2 se muestra la ubicación de la carga térmica (CT) para los tres casos de niveles de fluido en el tanque. En este caso el parámetro de la carga térmica aproximada es unitaria y lo que se varía es la ubicación de la carga: cilindro completo, zona media superior y zona superior de la cascara cilíndrica.

Nivel de Fluido (V-M-LI)	Tmax por Transf Termica	Ubicación del CT
0	400,4	Cilindro Completo
0,5	415,4	Cilindro Mitad Superior
1	407,3	Cilindro Zona Superior

Tabla 2: Parámetros de carga y ubicación. Niveles de Fluido. 0: vacío, 0.5: medio, 1: lleno

Los parámetros de la carga térmica utilizados para las cuatro separaciones entre tanques, 0.33 diámetros (distancia reglamentaria), 1 diámetro, 1.5 diámetros y 2 diámetros, se muestran en la Tabla 3. Para el caso 1 de aproximación del parámetro de ajuste de la carga, éste varía de 1.6 a 0.6 para 0.33 diámetros a 2 diámetros de separación entre tanques. Para el caso 2 el parámetro de ajuste varía de 1.4 a 0.5.

Separacion de TK (por D)	Tmax por Transf Termica	Tmin por Transf Termica	Tprom por Transf Termica	Parametrizacion de la CT. Caso 1	Parametrizacion de la CT. Caso 2
0,33	629,8	487,0	558,4	1,6	1,4
1	400,4	309,5	355,0	1,0	0,9
1,5	303,8	258,2	281,0	0,8	0,7
2	236,8	201,9	219,4	0,6	0,5

Tabla 3: Parámetros de carga y ubicación. Separación de tanques

En la Tabla 4 se muestran los valores de los parámetros para cada caso de la inclinación de la llama debida a la velocidad del viento sobre el tanque en análisis. En este caso el parámetro de la carga térmica aproximada varía para el primer caso de estimación del parámetro de carga de 1 a 1.37 para 0 a 68 grados de inclinación de la llama. Para el segundo caso de estimación del parámetro de la carga, este varió de 0.9 a 1.2 para 0 a 68 grados de inclinación de la llama.

Inclinacion de la llama (Grados)	Tmax por Transf Termica	Tmin por Transf Termica	Tprom por Transf Termica	Parametrizacion de la CT. Caso 1	Parametrizacion de la CT. Caso 2
0	400,4	309,5	355,0	1,00	0,9
30	449,3	345,3	397,3	1,12	1,0
45	462,4	355,3	408,9	1,15	1,0
60	485,3	335,5	410,4	1,21	1,0
68	549,0	378,9	464,0	1,37	1,2

Tabla 4: Parámetros de carga y ubicación. Inclinación de la Llama

#### 4 MODELACIÓN NUMÉRICA

Cuando la respuesta precrítica es aproximadamente lineal se puede hacer un análisis lineal elástico para estimar el valor de la carga crítica. El programa ABAQUS (2006) permite estimar el pandeo elástico definiendo un paso de Buckle, para la obtención de autovalores, LBA. Estos son múltiplos del estado de carga que se incorpora a la estructura, considerando al primero como la carga crítica para la que se alcanza la inestabilidad del equilibrio. La solución se obtiene resolviendo un problema de autovalores y autovectores expresado por la Ecuación 2.

$$(K_0 + \lambda_i \cdot K_G) \Phi_i = 0 \quad (2)$$

donde  $K_0$  es la matriz de rigidez lineal del sistema,  $K_G$  la matriz de carga-geometría, que incluye la parte no lineal de las relaciones cinemáticas,  $\lambda_i$  es la carga crítica (el autovalor) y  $\Phi_i$  la forma de modo (el autovector).

La temperatura crítica  $T_C$  se calcula en función de la temperatura máxima hallada para la distribución de temperaturas y del parámetro crítico ( $\lambda_i$ ), esto se muestra en la Ecuación 3

$$T_c = \lambda_i \cdot T_{max} \quad (3)$$

Las condiciones de sustentación de los tanques se supusieron como simplemente apoyadas.

En la discretización se utilizan dos tipos de elementos. En el casco cilíndrico de los tanques con techo cónico se usa un elemento cuadrilátero parabólico S8R5 y en el techo un elemento triangular parabólico STRI65.

#### 5 ANALISIS Y RESULTADOS

Se realizan análisis de pandeo sobre el tanque de estudio, solicitándolo en primera instancia con el resultado del campo térmico determinado por el análisis de Transferencia de Calor para cada caso. En la Figura 5 se muestra un resumen de las Temperaturas Críticas calculadas para cada variante estudiada: variación de nivel de fluido en el tanque (vacío, medio y lleno), separación entre tanques (0.33 D, 1 D, 1.5 D y 2 D de separación) y finalmente la inclinación de la llama del fuego debida a la velocidad del viento (0°, 30°, 45°, 60°, 68°).

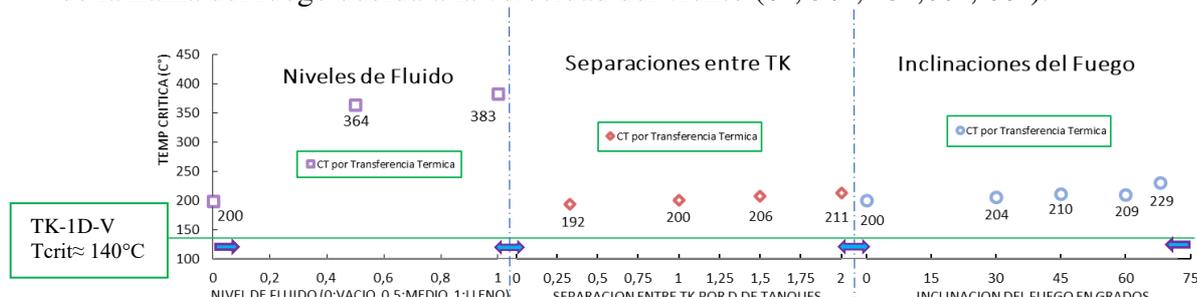


Figura 5: Tcrit para las tres variables estudiadas para CT, calculadas por transferencia de calor

Adicionalmente, se representa en línea verde el valor de la temperatura crítica ( $\approx 140^\circ\text{C}$ ) determinada por la carga simplificada  $\cos^2\theta$  para el caso de comparación TK-1D-V. Nótese que el método tal como fue usado por los autores en el pasado, da un solo valor de temperatura crítica uniforme en altura, porque no toma en cuenta ningún efecto de la fuente.

Se observa que el valor de temperatura crítica aproximada es muy bajo con respecto a los hallados a partir del análisis de transferencia de calor. Para el caso de referencia ( $T_c = 200^\circ$  por transferencia de calor), la diferencia es de  $140/200 = 0.7$ , o sea que el análisis aproximado da una temperatura crítica que es un 30% menor que la esperable en un análisis acoplado. Si el tanque objetivo está lleno hasta la mitad, la relación sube a  $140/364 = 0.39$ , o sea que el método aproximado está 61% por debajo del valor mejor. Para una separación entre tanques de 2D la relación resulta de  $140/211 = 0.66$ , o sea un 33% por debajo. Un viento que inclina la llama a  $60^\circ$  la relación es un 33% por debajo.

### 5.1 Análisis simplificado usando valores parametrizados

En la Figura 6 se muestran los modos críticos y las temperaturas asociadas para el caso del tanque de comparación TK-ID-V, con el campo térmico obtenido por transferencia de calor (CT: TC) y el aproximado (CT: Aprox).

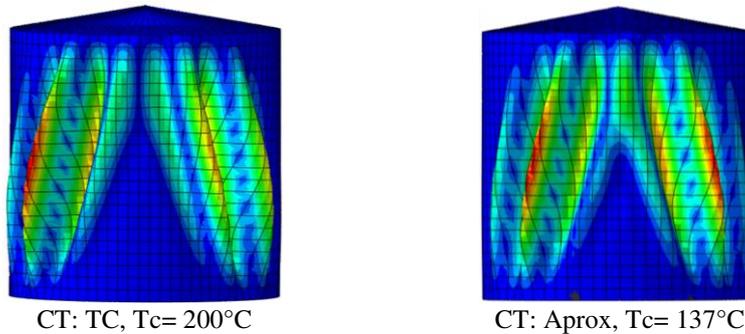


Figura 6: Modos de Deformación para CT por transferencia y aproximado. TK-ID-V

A través de la parametrización realizada a la carga térmica simplificada se realiza el cálculo de los tres casos estudiados (niveles de fluido interno, separación entre tanques e inclinación de la llama de fuego) pero utilizando la carga simplificada parametrizada. En la Tabla 4 se muestra una síntesis de los resultados encontrados para el análisis de los tres niveles de fluido interno.

Parametro de Ajuste	CT por Transf. Termica			CT Aprox Normalizada. Caso 1			
	Tmax	$\lambda$	Tcri (Trans.)	Tmax Aprox	$\lambda$	Tcri (Aprox)	E rel.
0	400,4	0,499	200	1,0	139,2	139	30%
0,5	415,4	1,141	364	1,0	372,6	373	2%
1	407,3	0,941	383	1,0	442,4	442	15%

Tabla 4: Resultados para el análisis de los tres niveles de fluido interno estudiados. 0: vacío, 0.5: medio, 1: lleno

En la Figura 7 se representan las curvas de las temperaturas críticas para los diferentes niveles de fluido, considerando el campo térmico (CT) determinado por el análisis de transferencia de calor y mediante el campo térmico aproximado parametrizado.

En la Figura 8 se muestra un resumen de los modos de deformación obtenidos por la carga térmica calculada por transferencia de calor (CT: TC) y por la carga térmica aproximada (CT: Aprox.) para los tres niveles de fluido.

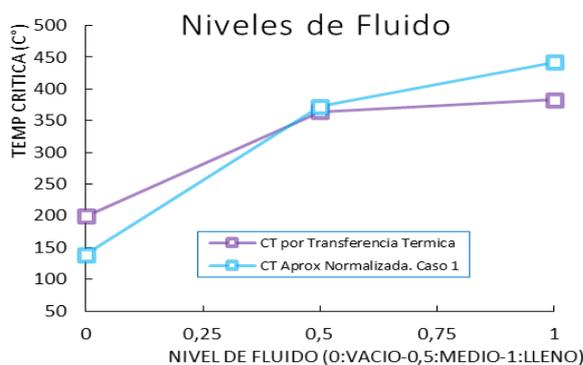


Figura 7: Tcrit para CT por Transferencia de calor y aproximado. Niveles de Fluido

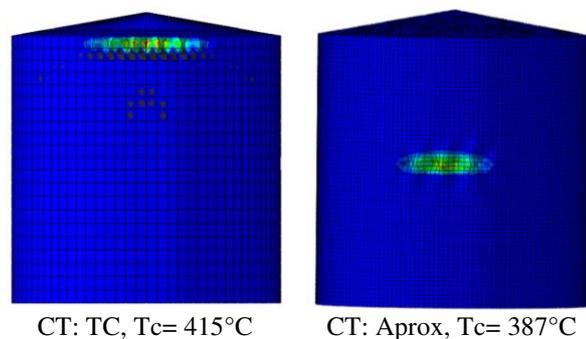


Figura 8: Deformación para CT por transferencia y aproximado. Niveles de Fluido Medio

Se presenta diferencia en el modo asociado al modelo del tanque con fluido hasta la mitad. Las temperaturas presentan buena aproximación.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los resultados calculados para el análisis de cada una de las separaciones entre tanques estudiados para el campo térmico obtenido por transferencia de calor y campos térmicos aproximados.

Parametro de Ajuste	CT por Transf. Termica			CT Aprox Normalizada. Caso 1				CT Aprox Normalizada. Caso 2						
	Tmax	$\lambda$	Tcri (Trans.)	Tmax Aprox	$\lambda$	Tcri (Aprox)	E rel.	Tmax	Tmin	Tprom	Tmax Aprox	$\lambda$	Tcri (Aprox)	E rel.
0,33	629,8	0,305	192	1,6	92,8	146	24%	629,8	487,0	558,4	1,4	107,05	149	22%
1	400,4	0,499	200	1,0	139,2	139	30%	400,4	309,5	355,0	0,9	154,63	137	31%
1,5	303,8	0,679	206	0,8	198,8	151	27%	303,8	258,2	281,0	0,7	198,81	140	32%
2	236,8	0,891	211	0,6	231,9	137	35%	236,8	201,9	219,4	0,5	278,33	152	28%

Tabla 5: Resultados para el análisis de las tres separaciones entre tanques analizados.

En la Figura 9 se representan las curvas de las temperaturas críticas para los diferentes niveles de fluido, considerando el campo térmico determinado por el análisis de transferencia de calor y por campo térmico aproximado parametrizado.

En la Figura 10 se muestra un resumen de los modos de deformación obtenidos por la carga termica (CT) calculada por transferencia de calor y aproximada para cada separación entre tanques considerada.

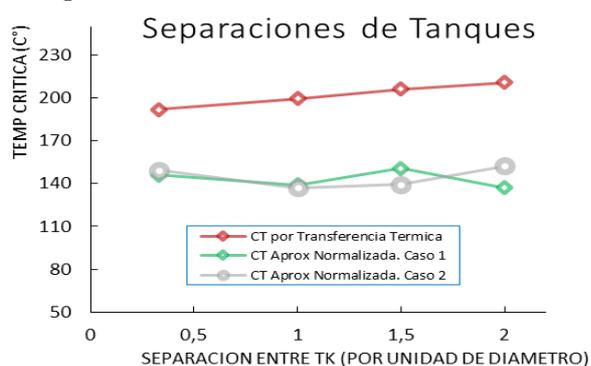


Figura 9: Tcrit para CT por Transferencia de calor y aproximado. Separaciones de Tanques

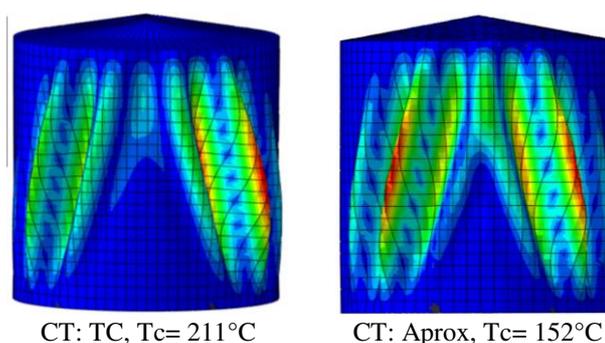


Figura 10: Modos de Deformación para CT por transferencia y aproximado. Separación entre tanques: 2D

Las deformadas asociadas a las temperaturas críticas son muy similares para las cuatro separaciones de tanques propuestas.

Se muestra un resumen de las temperaturas críticas, en la Tabla 6, de los resultados determinados para el análisis de cada una de las inclinaciones de la llama de fuego debidas al viento estudiados.

Parametro de Ajuste	CT por Transf. Termica			CT Aprox Normalizada. Caso 1				CT Aprox Normalizada. Caso 2						
	Tmax	$\lambda$	Tcri (Trans.)	Tmax Aprox	$\lambda$	Tcri (Aprox)	E rel.	Tmax	Tmin	Tprom	Tmax Aprox	$\lambda$	Tcri (Aprox)	E rel.
0	400,4	0,499	200	1,00	139,2	139	30%	400,4	309,5	355,0	0,9	154,63	137	31%
30	449,3	0,455	204	1,12	128,9	145	29%	449,3	345,3	397,3	1,0	139,17	138	32%
45	462,4	0,455	210	1,15	126,5	146	31%	462,4	355,3	408,9	1,0	139,17	142	32%
60	485,3	0,431	209	1,21	120,0	145	30%	485,3	335,5	410,4	1,0	139,17	143	32%
68	549,0	0,418	229	1,37	105,4	145	37%	549,0	378,9	464,0	1,2	126,51	147	36%

Tabla 6: Resultados para el análisis de las cuatro inclinaciones de la llama por el viento.

Finalmente se muestra en la Figura 11 las curvas de las temperaturas críticas de cada una de las inclinaciones de la llama, considerando el campo térmico determinado por el análisis de transferencia de calor y por campo térmico aproximado parametrizado.

En la Figura 12 presenta un resumen de los modos de deformación obtenidos por la carga térmica calculada por transferencia de calor y por la carga térmica aproximada para cada separación entre tanques considerada.

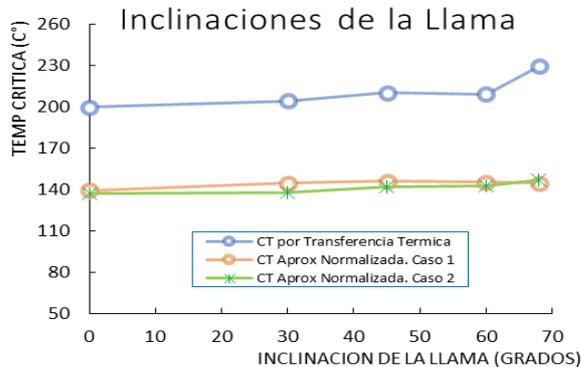


Figura 11: Tcrit para CT por Transferencia de calor y aproximado. Inclinaciones

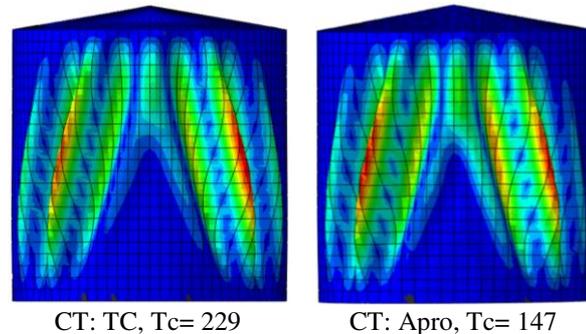


Figura 12: Modos de Deformación para CT por transferencia de calor y aproximado. Inclinación de la llama: 68°

No se observan diferencias importantes en los modos de deformación para los casos en que la llama tiene inclinación.

## 6 CONCLUSIONES

Se realizaron análisis de pandeo mediante bifurcación lineal para la comparación del comportamiento térmico de un tanque metálico solicitado por una carga térmica obtenida por la modelación por transferencia de calor y por una carga aproximada con una ley de variación  $\cos^2\theta$ . El estudio realizado se hizo sobre tres variables: nivel de fluido (tres casos), separación entre tanques (cuatro casos) e inclinaciones de la llama (cinco casos).

En la versión aproximada que han usado los autores en el pasado, la carga de bifurcación resulta muy por debajo de la calculada por transferencia de calor, variando entre un 30% y un 60% de acuerdo a las condiciones consideradas. Tales valores serian un límite inferior, pero con valores alejados de los más representativos.

La carga térmica simplificada fue parametrizada para realizar comparaciones de modos de deformación y temperaturas críticas.

Los modos de deformación son muy similares en los casos de tanques llenos y vacíos de fluido. Se presenta una diferencia en el caso del tanque con fluido hasta la mitad, mostrando una localización de la deformada en la parte superior usando la carga térmica obtenida por transferencia de calor pero utilizando la carga térmica aproximada la deformada se localiza en la parte central del tanque. En los tres casos de niveles de fluido considerados, las temperaturas críticas presentan en promedio una diferencia del 16%.

Se observan modos de deformación muy similares, con leves diferencias. Las deformaciones en la parte central superior se presentan más cerca del centro con el uso de la carga térmica aproximada. En los cuatro casos de separaciones entre tanques, las temperaturas críticas presentan en promedio una diferencia del 29% considerando la carga simplificada del caso 1 y del 28% usando la carga del caso 2.

No se observan diferencias en los modos de deformación en los casos en que la llama tiene una cierta inclinación. En los cinco casos estudiados de inclinación de la llama, las temperaturas críticas presentan en promedio una diferencia del 34% considerando la carga simplificada del caso 1 y del 32% usando la carga del caso 2.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen el financiamiento de PICTO Fundación YPF 2022.

## REFERENCIAS

- ABAQUS. Simulia. Unified FEA. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island, USA, 2006.
- Batista-Abreu J., Godoy L. A., Thermal buckling behavior of open cylindrical oil storage tanks under fire, *ASCE J. Performance of Constructed Facilities*, 27(1): 89–97, 2013.
- Burgos C., Batista-Abreu J., Calabró H., Jaca R., Godoy L., Simplificaciones en el tratamiento computacional de condiciones en la parte superior de tanques de almacenamiento de fluidos, *Thin-Walled Structures* vol. 91, pp. 29-37, 2015.
- Calabró H., Godoy L., Jaca R., Comportamiento estructural de tanques de almacenamiento de petróleo debido a fuego, *Mecánica Computacional*, 32: 3367-3378, 2013.
- Calabró H., Godoy L., Jaca R., Inestabilidad de tanques de almacenamiento de petróleo con techo cónico durante un incendio, *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 11(1): 7-28, 2014.
- Da Silva Santos, 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., Godoy L.A., Thermal and structural analysis of a fuel storage tank under an adjacent pool fire, *Fire Research*, 2:48, 31-36, 2018.
- Espinosa S.N., Jaca R.C., Godoy L.A., Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank, *J. Loss Prevention in the Process Industry*, 103990, 62:1-12, 2019.
- 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., Jaca R.C., Ameijeiras M.P., On buckling of oil storage tanks under nearby explosions and fire, Capítulo 7 en: *Above Ground Storage Tank Oil Spills: Applications and Case Studies*, M. Fingas (Ed.), Elsevier, 199-259, 2022.
- Jaca R., Calabró H., Espinosa S., 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., Espinosa S., Godoy L.A., Metodologías para trayectorias no lineales geométricas en cáscaras bajo efectos térmicos, *Mecánica Computacional*, 36: 235-244, 2018.
- Jaca R., Godoy L.A., Calabró H., Espinosa S., Thermal post-buckling behavior of oil storage tanks under a nearby fire, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 189: 104289, 2020
- Liu Y., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire. *Phd Thesis, The University of Edinburgh*, 2011.
- Liu, Y., Chen J.F., Rotter, J.M., Torero, J.T., Ai J., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire, *Proc. First Int. Conf. on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering*, Hong Kong, 156-165, 2012.
- Maraveas, C. Thermal buckling analysis of thin-walled steel oil tanks exposed to an adjacent fire, *Proc. 23rd Australasian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials*, Byron Bay, Australia, S.T. Smith (Ed.), 9-12, 2014.
- Pantousa D., Numerical study on thermal buckling of empty thin-walled steel tanks under multiple pool-fire scenarios, *Thin-Walled Structures*, 131: 577-594, 2018.
- Pantousa D., Tzaros K., Kefaki M., Thermal buckling behaviour of unstiffened and stiffened fixed-roof tanks under non-uniform heating. *Journal of Constructional Steel Research*, 143:162-179, 2018.
- Pantousa D., Godoy L.A., On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks, *Thin-Walled Structures*, 145, 106432, 2019.