

VALIDACIÓN DEL SOLVER RHOCENTRALFOAM PARA PREDECIR CARGAS SOBRE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES DEBIDO A EXPLOSIONES

VALIDATION OF THE RHOCENTRALFOAM SOLVER FOR PREDICTING LOADS ON FUEL STORAGE TANKS FROM EXPLOSIONS

Lucas Monaldi^{a,b}, Luis Felipe Gutiérrez Marcantoni^b y Sergio A. Elaskar^{a,b}

^a*CONICET - Instituto de Estudios Avanzados en Ciencia e Ingeniería. Córdoba, Argentina,*
lucas.monaldi@unc.edu.ar, selaskar@unc.edu.ar

^b*Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Departamento
de Ingeniería Aeroespacial. Córdoba, Argentina.*

Palabras clave: *blast wave, explosión, OpenFOAM, tanque de almacenamiento.*

Resumen. Este trabajo valida el uso del esquema numérico Kurganov-Noelle-Petrova (KNP) en el *solver rhoCentralFoam* de OpenFOAM para simular ondas de explosión y su interacción con tanques de almacenamiento. El modelo emplea una aproximación simplificada de liberación instantánea de energía en geometrías esféricas o cilíndricas, prescindiendo de reacciones químicas y considerando solo aire. Esta simplificación ofrece grandes ventajas computacionales, reduciendo la complejidad numérica mientras mantiene la precisión en los parámetros clave de la onda de choque. La validación se realizó comparando los resultados con soluciones analíticas (teoría de Sedov), directrices empíricas y datos experimentales. Los resultados demuestran que el esquema captura con alta precisión las sobrepresiones (error <10 %), los tiempos de llegada (error <5 %) y fenómenos complejos como las reflexiones de Mach. El estudio confirma que el método KNP es una herramienta robusta y fiable para el análisis de riesgos y evaluaciones de seguridad en instalaciones industriales, destacando la crucial importancia de considerar los efectos tridimensionales para mejorar los estándares de protección.

Keywords: *blast wave, explosion, OpenFOAM, storage tank.*

Abstract. This study validates the use of the Kurganov-Noelle-Petrova (KNP) numerical scheme in OpenFOAM's *rhoCentralFoam solver* for simulating *blast waves* and their interaction with fuel storage tanks. The model uses a simplified approach based on the instantaneous release of energy from spherical or cylindrical geometries, ignoring chemical reactions and modeling only air. This simplification offers major computational advantages by reducing numerical complexity while maintaining accuracy in key shock wave parameters. Validation was performed by comparing results against analytical solutions (Sedov theory), empirical guidelines, and experimental data. The results show the scheme accurately captures overpressures (error <10 %), arrival times (error <5 %), and complex phenomena like Mach reflections. The study confirms the KNP method is a robust and reliable tool for risk analysis and safety evaluations in industrial facilities, highlighting the crucial importance of three-dimensional effects for improving protection standards.

1. INTRODUCCIÓN

De especial preocupación son las fallas en tanques de almacenamiento de combustible atmosférico. Estas estructuras son especialmente susceptibles a daños por sobrepresión o vacío debido a su inherente vulnerabilidad estructural. Aunque la mayoría de estos incidentes no causan lesiones, frecuentemente resultan en pérdidas materiales sustanciales, daños a equipos e interrupciones productivas. La interacción de ondas explosivas con tanques atmosféricos de pared delgada (6-25 mm) presenta grandes riesgos de seguridad, representando más del 30 % de accidentes en la industria de procesos (Kletz y Amyotte, 2019). Estos eventos generan cargas complejas mediante transmisión de choques, presión dinámica e incendios, con efectos altamente dependientes de la evolución espacio-temporal de la explosión (Taveau, 2011; Godoy et al., 2019).

El estudio de explosiones intensas por liberación rápida de energía puede abordarse mediante dos metodologías: resolviendo las ecuaciones fundamentales de dinámica de gases o empleando soluciones de similitud (Sedov, 2018). Aunque los métodos de similitud ofrecen soluciones analíticas para casos idealizados y geometrías simples (Ben-Dor, 2007), resultan inadecuados para escenarios complejos con procesos no estacionarios como reflexión de ondas de choque e interacciones entre ellas. El poder computacional actualmente disponible en sistemas de escritorio (o *clusters* en universidades y centros de investigación) ha convertido a la solución numérica de las ecuaciones de dinámica de gases en el enfoque preferido para estudiar estos fenómenos.

El trabajo valida el esquema KNP en el *solver rhoCentralFoam* de OpenFOAM™ mediante tres *benchmarks*: soluciones analíticas (Sedov), datos empíricos (UFC-340-02, 2008) y mediciones experimentales (Roh et al., 2020; Duong et al., 2012). Nos enfocamos en explosiones hemisféricas y esféricas cerca de tanques, demostrando la capacidad del esquema para capturar características clave como la formación del pie de Mach y distribuciones de presión no uniformes, críticas para evaluaciones de seguridad en la industria petrolera y gasífera.

El esquema KNP ofrece un enfoque alternativo mediante esquemas centrales que mantienen la precisión mientras evitan oscilaciones espurias. Este método fue implementado posteriormente en OpenFOAM™ por Greenshields et al. (2010) y ha ganado amplia adopción en la comunidad científica (Jasak, 2009). La validación del *solver* tiene un valor significativo para instituciones de investigación, particularmente dada su efectividad comprobada en simulaciones de flujo supersónico (Gutiérrez Marcantoni et al., 2021). A su vez, todas las simulaciones se realizan despreciando el efecto de la viscosidad (Monaldi et al., 2023).

Trabajos recientes de Monaldi et al. (2022) han verificado la capacidad del esquema numérico de Kurganov-Noelle-Petrova (KNP), implementado en el *solver rhoCentralFoam* de OpenFOAM™, para simular con precisión reflexiones no estacionarias de ondas de choque sobre superficies planas. Su validación incluyó comparaciones con soluciones teóricas de pseudo-estacionario (al no estar disponibles referencias teóricas no estacionarias), verificación cruzada con otros métodos numéricos y correlación con datos experimentales. Estas evaluaciones integrales demuestran que el esquema KNP, tal como se emplea en la implementación actual, capta de forma fiable la compleja física que gobierna las reflexiones no estacionarias de choques sobre superficies planas.

El enfoque utilizado en este trabajo asume que la explosión puede considerarse como una cantidad de energía E_{0i} concentrada en un punto para explosiones esféricas o a lo largo de una línea para explosiones cilíndricas, y que se libera casi instantáneamente (Tamagno et al., 2020). Una ventaja clave del marco conceptual descrito en este trabajo es su aplicabilidad a explosiones de diversos orígenes. En este caso, las reacciones químicas o modelos que consideran

tales fenómenos no se incluyen en las simulaciones, reduciendo significativamente el tiempo computacional. El aire es la única especie considerada en las simulaciones.

La metodología desarrollada aquí es aplicable a interacciones explosión-estructura en entornos industriales, incluyendo pero no limitándose a tanques de almacenamiento, edificios o barreras protectoras.

2. SIMULACIONES NUMÉRICAS

Se resumen a continuación las diferentes comparaciones realizadas con resultados analíticos, empíricos y experimentales. Para cada caso, se realizó un estudio de sensibilidad de malla y CFL (número de Courant-Friedrichs-Lowy que relaciona el tamaño de la grilla con el paso de tiempo). OpenFOAMTM permite fijar un CFL máximo y calcular Δt para cada paso de tiempo) siguiendo lo hecho en [Gutiérrez Marcantoni et al. \(2021\)](#); [Monaldi et al. \(2022\)](#).

2.1. Solución de Sedov

En primer lugar, se realiza una comparación con las soluciones analíticas de Sedov ([Sedov, 2018](#); [Whitham, 2011](#); [Tamagno et al., 2020](#)) para tres números de Mach de la onda de choque diferentes: $M = 2$, $M = 5$ y $M = 10$. En este estudio, la onda de choque se genera mediante una liberación instantánea de energía concentrada en un solo punto. Aprovechando la simetría del problema, solo se simula un cuadrante del dominio físico.

Las simulaciones se realizan en dos dimensiones empleando la condición de contorno `empty` y para garantizar el comportamiento bidimensional del flujo ([Jasak, 2009](#)). La zona de liberación de energía se sitúa en la esquina inferior izquierda del dominio. En esta región, la presión y temperatura iniciales son significativamente más altas que en el área no perturbada, lo que genera la onda de choque. Se asume que la energía liberada E_{0i} está contenida dentro de un círculo de radio $R(0) = 10$ cm (o una esfera en el caso de un dominio tridimensional). La densidad inicial en todo el dominio se establece en $1,1936 \text{ kg/m}^3$, mientras que la presión en la región de alta energía se calcula utilizando la ecuación propuesta por [Gutiérrez Marcantoni et al. \(2021\)](#):

$$p_{0i} = \frac{3(\gamma - 1) E_{0i}}{(\beta + 1) \pi R(0)^\beta} \quad (1)$$

donde $\gamma = 1,4$ es el coeficiente de dilatación adiabático del aire, mientras que el parámetro β depende de la dimensionalidad del problema: $\beta = 2$ para ondas de choques cilíndricas y $\beta = 3$ para esféricas.

La Tabla 1 compara los valores de presión y velocidad del frente de onda en $t = 28 \mu\text{s}$ para diferentes valores de energía inicial, utilizando la reconstrucción *upwind*. La primera columna indica la energía liberada en kg de TNT (1kg de TNT = 4,184 MJ), lo que permite obtener el número de Mach del frente de onda (dado en la segunda columna) a una distancia $R(t) = 2$ m, justo antes de llegar al límite derecho del dominio. Mientras que los valores de presión y velocidad se calculan empleando la teoría de Sedov ([Sedov, 2018](#); [Tamagno et al., 2020](#)):

$$p_s(t) = \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma + 1} \frac{E_{0i}}{R(t)^2}; \quad u_s(t) = \frac{1}{\gamma + 1} \left(\frac{E_{0i}}{\rho_{0e} R(t)^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Asimismo, la Fig. 1 muestra los perfiles de presión y velocidad de la *blast wave* normalizados por la presión y velocidad del frente de onda, para un número de Mach de $M_s = 10$. Como anticipaba la Tabla 1, las diferencias porcentuales en los valores del frente de onda son muy pequeñas. Adicionalmente, se observa una buena concordancia para todo el perfil, es decir, para todos los valores de presión y velocidad en los diferentes puntos del dominio x/L .

E_{i0} [kg TNT]	M_s	P_s OF [MPa]	P_s Sedov [MPa]	Dif. [%]	U_s OF [m/s]	U_s Sedov [m/s]	Dif. [%]
2.0856	2	0.6174	0.4547	26.35	555.96	582.96	4.6
13.441	5	2.9768	2.9304	4.5	1425.79	1478.39	3.5
53.995	10	11.24	11.772	1.56	2877.8	2963	3.1

Tabla 1: Comparación de la presión y velocidad detrás de la onda de choque utilizando la teoría de Sedov y las simulaciones numéricas en OpenFOAM™ en $t = 28 \mu s$.

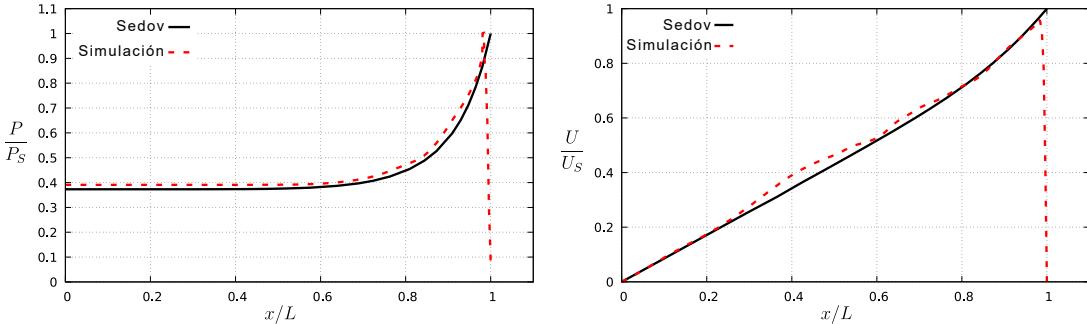


Figura 1: Comparación entre perfiles de presión (izquierda) y velocidad (derecha) entre la teoría analítica de Sedov y las simulaciones numéricas en OpenFOAM™ en $t = 28 \mu s$ para un número de Mach de onda de $M_s = 10$.

2.2. Comparación con Manual UFC

Habiendo verificado que la metodología de liberación de energía reproduce la Solución de Sedov, se comparan los resultados de las presiones reflejadas sobre las paredes. El manual UFC 3-340-02 ([UFC-340-02, 2008](#)) proporciona metodologías empíricas para estimar parámetros de la onda de choque, como las sobrepresiones incidente y reflejada, en función de la distancia escalada Z . Estas metodologías se basan en una combinación de datos experimentales, modelos semi-empíricos y análisis numéricos.

Esta sección emplea el marco del UFC 3-340-02 para evaluar las presiones reflejadas e impulsos sobre paredes, comparando las predicciones teóricas con los resultados de las simulaciones realizadas en OpenFOAM™. El análisis se basa en la metodología del informe de [Karlos y Solomos \(2013\)](#), que proporciona directrices para calcular cargas de explosión. Todas las relaciones propuestas implican el cálculo de la distancia escalada $Z = R/\sqrt[3]{W}$, donde W es la masa equivalente de TNT y R la distancia desde el centro de una explosión esférica. Los tres casos estudiados se presentan en la Fig. 2.

2.2.1. Caso 1: Carga Esférica

Inicialmente, se supone una explosión en el aire, como se ilustra en el **CASO 1** de la Fig. 2. La *blast wave* se genera por una carga explosiva equivalente a 750 kg de TNT, posicionada a una altura de 20 m sobre el suelo. Los parámetros de la explosión se determinarán para tres ubicaciones distintas, cuyas distancias escaladas son $Z_A = 1,44 \text{ m/kg}^{1/3}$, $Z_B = 2,54 \text{ m/kg}^{1/3}$ $Z_C = 4,402 \text{ m/kg}^{1/3}$. La simulación numérica sigue el dominio de la Fig. 2 y es tridimensional. En el contorno inferior se aplica la condición de *deslizamiento* (*slip*) para la velocidad y una condición de gradiente nulo (*zeroGradient*) para la presión ([Ferziger et al., 2019](#)); mientras que en los demás bordes se aplica una condición transmisiva.

La Tabla 2 presenta una comparación entre los tiempos de llegada, las presiones reflejadas y

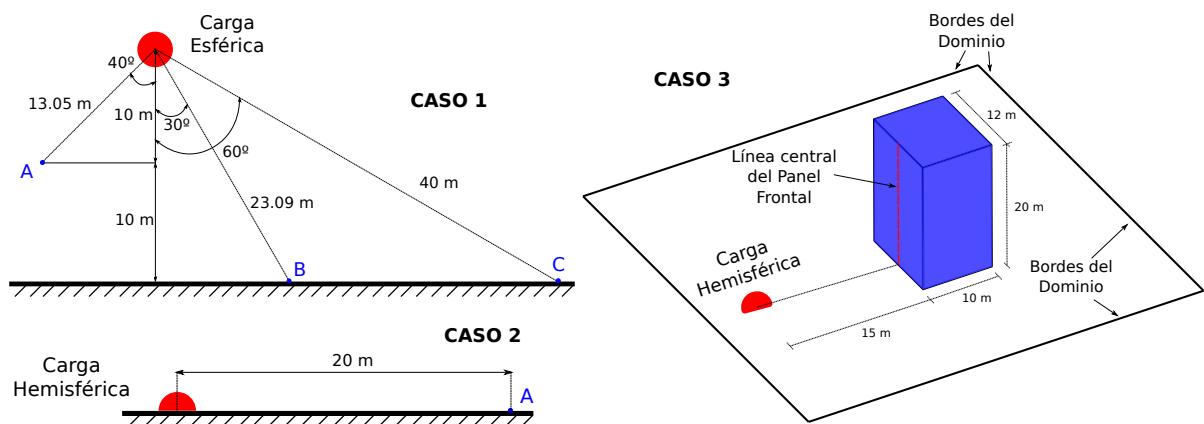


Figura 2: Casos estudiados adaptados de [UFC-340-02 \(2008\)](#) y [Karlos y Solomos \(2013\)](#).

los impulsos obtenidos de [Karlos y Solomos \(2013\)](#) (basados en [UFC-340-02 \(2008\)](#)) y las simulaciones de OpenFOAM™ para los puntos **A**, **B** y **C**. Los resultados muestran discrepancias por debajo del 10 % en la presión reflejada, del 5 % en el tiempo de llegada para los tres puntos de medición y cercanas al 14 % para los impulsos reflejados.

	PUNTO A			PUNTO B			PUNTO C		
-	UFC	OF	Dif. [%]	UFC	OF	Dif. [%]	UFC	OF	Dif. [%]
Tiempo de Arribo [ms]	9.6	10	4.16	27.2	28	2.94	67.2	68	1.19
Presión Reflejada [MPa]	409.5	409.28	0.05	317.3	301.73	4.91	99.7	90.45	9.27
Impulso Reflejado [kPa-ms]	1137.5	1069.6	5.97	1635.4	1484.1	9.25	415.2	356.67	14.2

Tabla 2: Comparación entre los resultados de [Karlos y Solomos \(2013\)](#) y las simulaciones numéricas empleando OpenFOAM™ para los Puntos **A**, **B** and **C** del Caso 1 en la Fig. 2.

2.2.2. Caso 2: Carga hemisférica

En el **CASO 2** de la Fig. 2, una onda de explosión hemisférica es generada por una detonación de 100 kg de TNT en el suelo. El tiempo de llegada de la onda de choque y los impulsos de presión reflejada se comparan con resultados numéricos obtenidos utilizando OpenFOAM™. El punto de interés, **A**, está ubicado a 20 m de la carga, lo que corresponde a una distancia escalada de $Z = 4.31 \text{ m/kg}^{1/3}$. Este caso difiere significativamente del Caso 1 debido a las características distintivas del campo de flujo. Por ejemplo, la pierna de Mach no se forma ya que no ocurre reflexión de la onda de choque en la pared. El dominio computacional y las condiciones de contorno se mantienen similares a los del Caso 1. Sin embargo, las condiciones iniciales se modifican ligeramente porque la zona de liberación de energía ahora es hemisférica. En consecuencia, la presión inicial en la Ec. (1) debe duplicarse para contabilizar la liberación de energía equivalente a 100 kg de TNT.

Al analizar los resultados, se observan diferencias menores a 10 % para el tiempo de arribo de la onda de choque, la presión reflejada y el impulso en el punto de interés.

2.2.3. Caso 3: Carga hemisférica sobre un edificio

Se libera una energía de 1000 kg de TNT en el suelo a una distancia de 15 m de un edificio de 20 m de altura, tal como muestra el **CASO 3** de la Fig. 2. La carga explosiva se evaluará en cuatro ubicaciones distintas a lo largo del panel central. A medida que la onda de choque se refleja en la pared, las presiones e impulsos reflejados variarán gradualmente (Ben-Dor, 2007; Monaldi et al., 2022). El dominio tiene unos 20 millones de elementos y las condiciones de borde son similares al caso anterior.

La Tabla 3 muestra los tiempos de llegada, la presión reflejada y el impulso para diferentes alturas del edificio. Se registran discrepancias menores del 6 % en los tiempos de llegada de la onda, inferiores al 9 % en las presiones reflejadas y del 12 % en los impulsos reflejados a distintas alturas.

	Altura = 2 m			Altura = 6 m			Altura = 10 m			Altura = 14 m		
-	UFC	OF	Dif. [%]	UFC	OF	Dif. [%]	UFC	OF	Dif. [%]	UFC	OF	Dif. [%]
Tiempo de Arribo [ms]	9.87	9.2	6.79	11.24	11	2.13	13.68	14	2.56	17.59	17.75	0.91
Presión Reflejada [MPa]	2332	2272.5	2.59	1817	1682.8	7.38	1242.5	1161.8	6.49	853.3	784.3	8.08
Impulso Reflejado [kPa-ms]	4983.9	4696.9	5.76	4593.01	4284.9	6.73	4006.6	3824.5	4.55	3420.3	3021.2	11.67

Tabla 3: Comparación entre los resultados de Karlos y Solomos (2013) y las simulaciones numéricas para cuatro alturas en el panel central del Caso 3 de la Fig. 2.

Con base en los tres casos estudiados, y dado que las diferencias porcentuales entre los resultados de UFC-340-02 (2008) y las simulaciones numéricas se mantienen por debajo del 10 %, el solver rhoCentralFoam demuestra una capacidad satisfactoria para capturar tanto los tiempos de llegada de la onda explosiva como las presiones reflejadas en paredes. Esta conclusión es válida tanto para cargas esféricas como para configuraciones hemisféricas en suelo. La siguiente fase de validación consistirá en la comparación con resultados experimentales.

2.3. Roh y colaboradores

Los estudios de explosiones en ambientes industriales suelen asumir una explosión a nivel del suelo, una simplificación validada para nubes de vapor de fugas e ignición cerca de equipos congestionados a nivel de piso (Baker et al., 2012; UFC-340-02, 2008). Sin embargo, esta suposición falla para explosiones provocadas por liberaciones de gas elevadas desde *racks* de tuberías, techos o ventilaciones. Para estos escenarios, un modelo de liberación de energía a nivel del suelo representa inexactamente características clave de la explosión, incluida la direccionalidad de la onda y la distribución de presión reflejada (Monaldi et al., 2025). Motivados por esta limitación, estudiamos el trabajo de Roh et al. (2020), quien investigó la propagación e interacción de ondas de explosión en dos entornos distintos: espacios abiertos grandes y estructuras confinadas. Su estudio combinó simulaciones numéricas avanzadas con validación experimental de la dinámica de la onda de choque. En el presente trabajo, nos centramos específicamente en simulaciones de campo abierto para comparar mediciones de presión de cinco sensores posicionados a 1,8 m sobre el nivel del suelo, utilizando la configuración de carga de 5,6 kg de TNT mostrada en la Fig. 3. Esta configuración es particularmente significativa porque

evalúa la formación de la pierna de Mach y la reflexión en el suelo de la onda de choque (Ben-Dor, 2007; Monaldi et al., 2022). En consecuencia, las mediciones de presión en los sensores se verán fuertemente afectadas por la ubicación precisa del punto triple y la altura del tallo de Mach en desarrollo.

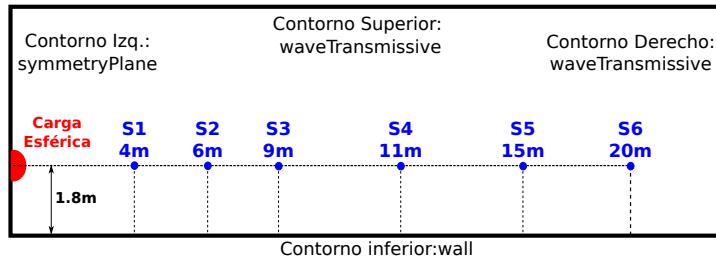


Figura 3: Condiciones de contorno y posición de los sensores de presión propuestos por Roh et al. (2020).

La Fig. 4 muestra la comparación de los valores de presión en el tiempo entre los resultados experimentales de Roh et al. (2020) y las simulaciones numéricas para los sensores 2 y 3 de la Fig. 3. Se observa como la simulación (en línea roja) describe adecuadamente la posición de la onda de choque incidente y reflejada para el caso del sensor 2, mientras que en el sensor 3 el perfil de presiones corresponde a la pierna de Mach formada producto de la reflexión de la *blast wave* en el piso. Para ambos sensores, la diferencia porcentual entre las presiones máximas de los resultados de Roh et al. (2020) y las simulaciones son de un 5,5 %. Aunque no se presente en el trabajo, las discrepancias entre los resultados experimentales y numéricos son similares para los otros cuatro sensores.

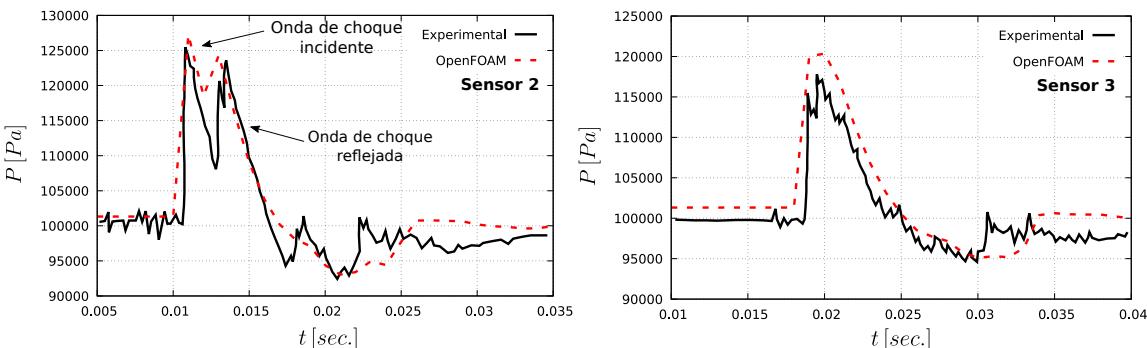


Figura 4: Comparación del historial de presiones para los sensores 2 y 3 de la Fig. 3 entre los resultados experimentales de Roh et al. (2020) y las simulaciones numéricas de OpenFOAMTM.

Analicemos brevemente la Fig. 5 para examinar las estructuras de onda formadas por la reflexión de la onda explosiva en el suelo. Las figuras incluyen las posiciones de los sensores propuestas por Roh et al. (2020), representadas como puntos negros a 1,8 m sobre el suelo y espaciados como se indica en la Fig. 3. Primero, observamos la onda incidente que emana del punto triple que define la altura la pierna de Mach. Es evidente cómo esta aumenta a medida que la onda de choque se refleja en el suelo. Una discusión detallada sobre las estructuras de onda se presenta en Ben-Dor (2007) y Monaldi et al. (2022). Estos estudios demuestran que el esquema KNP resulta ser una herramienta adecuada para reproducir con precisión las transiciones de una onda de choque no estacionaria que se refleja en una pared recta.

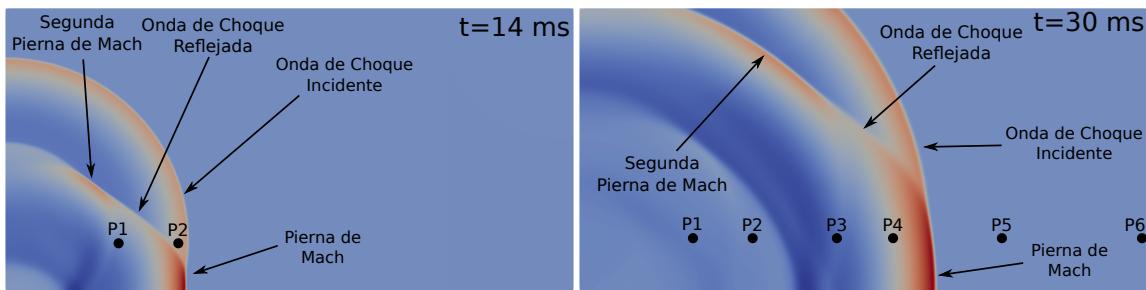


Figura 5: Contornos de presión de las simulaciones numéricas cuando la explosión ocurre a una altura de 1,8 m del suelo para dos instantes distintos. Las estructuras de ondas se presentan en las figuras al igual que la posición de los sensores de la Fig. 3.

2.4. Experimento de Duong y colaboradores

Uno de los estudios más relevantes de explosiones fue realizado en la Universidad del Loira Valley en Francia ([Duong et al., 2012](#)), mediante pruebas en modelos a pequeña escala (altura del tanque: 0,25 m). Midieron resultados en las paredes del tanque y realizaron un ajuste por mínimos cuadrados con el algoritmo Levenberg-Marquardt, obteniendo la siguiente ecuación para la sobrepresión máxima adimensional:

$$\log(\Delta P/P_0) = a (\log Z)^2 + b \log Z + c \quad (3)$$

donde $Z = R/\sqrt{W}$ [m kg^(-1/3)] es la distancia escalada. Los coeficientes a , b y c dependen de la posición circunferencial y altura en el tanque. La posición circunferencial ($0^\circ < \theta < 180^\circ$) se divide en 10 ángulos, mientras que la altura se clasifica en tres categorías: *baja*, *media* y *alta*. Esta formulación, aunque útil, es altamente aproximada. Además, la Ec. (3) y sus coeficientes se derivaron de experimentos que variaron la distancia de la explosión al tanque, pero no su altura, lo que representa una limitación significativa.

Se realizaron tres simulaciones con diferentes niveles de liberación de energía E_{0i} (distancias escaladas Z variables). La Tabla 4 compara las sobrepresiones entre los datos experimentales de [Duong et al. \(2012\)](#) (usando la interpolación de la Ec. (3)) y las simulaciones numéricas de OpenFOAM™. La distancia real entre el tanque y la zona de disipación de energía se mantuvo constante en 1,5 m para los tres casos. Se estudiaron tres posiciones circunferenciales ($\theta = 0^\circ$ frente a la explosión), comparando todos los resultados numéricos con los coeficientes para la altura *baja* ($h = 0$ m).

Para $\theta = 90^\circ$ y $\theta = 180^\circ$ se observan diferencias inferiores al 7 % en la presión reflejada sobre las paredes. Las diferencias son mayores en $\theta = 0^\circ$, donde la desviación estándar de los coeficientes de interpolación ronda el 11 %. Aunque los resultados numéricos se mantienen dentro de los rangos de desviación estándar para todas las posiciones del tanque, es importante señalar varias limitaciones clave. En primer lugar, las explosiones son solo a nivel del suelo (se omite el efecto de la pierna de Mach). A su vez, el método es una interpolación de datos experimentales con dispersión inherente, por lo que las desviaciones estándar (que dependen de la posición circunferencial θ) varían entre el 7,8 % y el 20 %, introduciendo incertidumbres significativas a los resultados. Al mismo tiempo, la resolución en altura es limitada, ya que los coeficientes de interpolación solo se definen para tres alturas del tanque (baja, media y alta). Una limitación similar se aplica a las posiciones circunferenciales. Finalmente, solo se dispone de presiones de pico reflejadas (no hay datos temporales), lo que restringe la capacidad de calcular cargas dinámicas críticas para análisis como el pandeo.

En vistas de lo expresado, las simulaciones numéricas permiten tener una discretización más adecuada tanto en la altura como en la posición circunferencial del tanque.

	E_{0i} [MJ]	Z [m/MJ ^{1/3}]	$\theta = 0^\circ$			$\theta = 90^\circ$			$\theta = 180^\circ$		
			Duong [kPa]	OF [kPa]	Dif. [%]	Duong [kPa]	OF [kPa]	Dif. [%]	Duong [kPa]	OF [kPa]	Dif. [%]
Caso 1	0.004186	9.307	121.97	108.86	9.93	104.25	105.04	0.75	102.14	103.28	1.12
Caso 2	0.04186	4.32	176.08	133.59	24.13	108.37	111.02	2.44	103.5	107.35	3.72
Caso 3	0.4186	2.005	412.76	353.78	14.29	119.23	127.48	6.91	107.64	113.54	5.47

Tabla 4: Comparación de sobrepresiones entre los resultados experimentales de Duong et al. (2012) (con la interpolación de la Ec. (3)) y los resultados numéricos, para diferentes distancias escaladas y diferentes posiciones circunferenciales en el tanque θ .

3. CONCLUSIONES

Este estudio muestra que el esquema KNP en el solver rhoCentralFoam implementado en OpenFOAM™ constituye un marco robusto para simulaciones de ondas de explosión en aplicaciones de seguridad industrial. Las validaciones realizadas contra referencias analíticas (Sedov), empíricas (UFC-3-340-02) y experimentales confirman su precisión para capturar fenómenos críticos como la formación de la pierna de Mach, tiempos de arribo de ondas y presiones e impulsos reflejados. La metodología de liberación de energía no química reduce los costos computacionales, permitiendo evaluaciones eficientes a escala real.

El trabajo destaca la importancia de las simulaciones multidimensionales para capturar efectos explosivos que los métodos simplificados no pueden abordar, como la distribución dinámica de presión a lo largo de alturas y posiciones circunferenciales de tanques. La metodología es particularmente valiosa para la seguridad en tanques de almacenamiento de combustible, ya que permite identificar zonas de alto riesgo donde las cargas de presiones o impulso sean más importantes.

Los trabajos futuros se centrarán en un estudio paramétrico exhaustivo de presiones reflejadas en tanques a escala real, incluyendo variaciones en distancias de explosión, múltiples alturas y diámetros de tanques, y configuraciones de carga hemisféricas (en suelo) versus esféricas (en altura), con el objetivo de establecer una base de datos integral para guías de diseño industrial. Los resultados obtenidos son prometedores e indican que esta metodología puede aplicarse efectivamente al diseño de estructuras de protección, análisis de riesgos y prevención de accidentes en la industria petrolera y gasífera, donde la seguridad es de primordial importancia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los Proyectos “Desarrollo y Aplicación de Estudios Teóricos, Numéricos y Códigos Computacionales en Mecánica de Fluidos e Intermitencia Caótica” de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNC, y PIP-2021-2023-GI “Efectos del Viento, Explosiones e Incendio en Tanques de Almacenamiento de Combustibles”. El primer autor es becario doctoral de CONICET. Se utilizaron recursos computacionales de UNC Supercomputo (CCAD), parte del SNCAD, Argentina.

REFERENCIAS

Baker W.E., Cox P., Kulesz J., Strehlow R., y Westine P. *Explosion hazards and evaluation*. Elsevier, 2012.

- Ben-Dor G. *Shock wave reflection phenomena*, volumen 2. Springer, 2007.
- Duong D.H., Hanus J.L., Bouazaoui L., Pennetier O., Moriceau J., Prod'homme G., y Reimeringer M. Response of a tank under blast loading—part i: experimental characterisation of blast loading arising from a gas explosion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(9):1023–1041, 2012.
- Ferziger J., Perić M., y Street R. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer International Publishing, 2019. ISBN 9783319996912.
- Godoy L.A., Elaskar S.A., Francisca F.M., Montoro M.A., Jaca R.C., Espinosa S.N., y Ameijeiras M.P. Efectos de desastres naturales y accidentes sobre infraestructura y medio físico en sistemas de almacenamiento y transporte de petróleo. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 6(2):21–34, 2019.
- Greenshields C.J., Weller H.G., Gasparini L., y Reese J.M. Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows. *International journal for numerical methods in fluids*, 63(1):1–21, 2010.
- Gutiérrez Marcantoni L.F., Elaskar S., Tamagno J., Saldía J., y Krause G. An assessment of the openfoam implementation of the knp scheme to simulate strong explosions. *Shock Waves*, 31(2):193–202, 2021.
- Jasak H. Openfoam: Open source cfd in research and industry. *International journal of naval architecture and ocean engineering*, 1(2):89–94, 2009.
- Karlos V. y Solomos G. Calculation of blast loads for application to structural components. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 5, 2013.
- Kletz T. y Amyotte P. *What Went Wrong?: Case Histories of Process Plant Disasters and How They Could Have Been Avoided*. Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN 9780128105405.
- Monaldi L., Elaskar S.A., y Marcantoni L.F.G. Efecto de la viscosidad en la reflexión de ondas de choques cilíndricas sobre paredes planas empleando openfoam. *Mecánica Computacional*, 40(10):443–452, 2023.
- Monaldi L., Gutierrez Marcantoni F., y Elaskar S. Parametric study of explosion height effects on blast loading characteristics for cylindrical storage tanks using cfd. *Process Safety and Environmental Protection*, (in press), 2025.
- Monaldi L., Gutiérrez Marcantoni L.F., y Elaskar S. Openfoamtm simulation of the shock wave reflection in unsteady flow. *Symmetry*, 14(10):2048, 2022.
- Roh T., Lee Y., Lee W., y Yoh J. Understanding the effects of blast loads on open spaces and enclosed structures in simulations and experiments. *Shock Waves*, 30(7):843–854, 2020.
- Sedov L. *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*. CRC Press, 2018. ISBN 9781351416566.
- Tamagno J., Elaskar S., Gutiérrez Marcantoni L.F., Saldía J.P., y Bruel P. Un análisis aproximado de la burbuja explosiva generada por liberación instantánea de energía. En *2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON)*, páginas 1–7. IEEE, 2020.
- Taveau J. Explosion of fixed roof atmospheric storage tanks, part 1: Background and review of case histories. *Process Safety Progress*, 30(4):381–392, 2011.
- UFC-340-02. Unified facilities criteria (ufc-340-02), structures to resist the effects of accidental explosions. *Department of Defense, United State of America*, 2008.
- Whitham G. *Linear and Nonlinear Waves*. Pure and Applied Mathematics: A Wiley Series of Texts, Monographs and Tracts. Wiley, 2011. ISBN 9781118031209.