

EXPLOSIONES DE GAS EN RECINTOS CERRADOS

Luciano Garelli, Rodrigo R. Paz, Gustavo Ríos, Mario A. Storti, Norberto M. Nigro

Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC), (INTEC-CONICET-UNL),

Güemes 3450, (S3000GLN) Santa Fe, Argentina. rodrigop@intec.unl.edu.ar,

<http://www.intec.ceride.gov.ar/~rodrigop>

Palabras clave: Simulación de explosiones, Ondas de choque, CFD.

Resumen. En este trabajo se presentan resultados obtenidos a partir de la simulación y del análisis de explosiones en recintos cerrados. Estas pueden ser originadas por la ignición de una mezcla de gases acumulados en un recinto, como en el caso de los hornos de destilación utilizados en la industria petroquímica, o provocadas por materiales explosivos.

El objeto de estudio es evaluar las posibilidades con las que cuenta actualmente la herramienta computacional PETSc-FEM para identificar adecuadamente las ondas de choque generadas por una explosión y sus posteriores reflexiones. Una vez indentificado el patrón de movimiento de las ondas en el interior del recinto, se analizará el efecto que tiene la implementación de un sistema de puertas contra explosiones. Las mismas tienen como objetivo disminuir las sobrepresiones, y por lo tanto el daño, que soporta la estructura.

1. INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo es analizar los fenómenos físicos que ocurren en el interior de un recinto cerrado cuando se produce una explosión y evaluar las capacidades con las que cuenta la herramienta de simulación PETSc-FEM para dar respuesta a este tipo de problema.

El estudio de la generación y propagación de ondas explosivas en recintos cerrados son de una importancia relevante desde el punto de vista de la seguridad de empresas químicas/petroquímicas que utilizan o producen materiales explosivos y/o gases inflamables (como por ejemplo fases condensadas de ciertos materiales, mezclas calientes de gas y aire, nubes de combustibles vaporizados, etc.). A lo largo de años se han producido un gran número de explosiones en distintos tipos de industrias, las cuales han generado pérdidas millonarias y causado lesiones humanas, inclusive fatales. Teniendo en cuenta los procesos que comunmente se llevan a cabo en las industrias petroquímicas, el principal problema surge con las potenciales explosiones que pueden originarse dentro de hornos debido a las condiciones físico-químicas que puedan alcanzar las materias primas y/o los productos intermedios y finales involucrados en el proceso. La característica más notable en un proceso explosivo es la gran cantidad de energía que se libera en periodos de tiempo del orden de los microsegundos, lo que se traduce en un incremento local y súbito de la presión que se propaga en forma de ondas con una velocidad que generalmente supera la velocidad del sonido (Rigas and Sklavounos, 2005; Bjerketvedt et al., 1997).

Se desea estudiar la influencia que puede tener la ubicación estratégica de “puertas contra explosiones” para aliviar las sobrepresiones que se generan en el interior de dichos recintos debido a una explosión, intentando reducir al mínimo el riesgo de accidentes humanos y en segunda instancia, minimizar el daño del equipo.

La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta que está siendo aplicada al análisis de una gran cantidad de procesos industriales. En el CIMEC se viene desarrollando desde 1998 una herramienta de CFD, llamado PETSc-FEM (<http://www.cimec.org.ar/petscfem>) basada en el método de los elementos finitos (FEM) usando procesamiento distribuido y programación orientada a objetos, la cual ha sido utilizada en una gran variedad de aplicaciones.

Con este tipo de análisis es posible simular las condiciones que pueden producir la explosión de los gases involucrados en tales procesos industriales, evaluar el nivel de riesgo que producirían y el daño que podrían ocasionar a la estructura. También se intenta probar las capacidades de la herramienta computacional a la hora de diseñar sistemas de seguridad contra este tipo de explosiones (distribución de puertas de seguridad, venteos, zonas de localización de sensores, etc.).

2. MODELADO NUMÉRICO DE LAS EXPLOSIONES

La simulación de una explosión generada por la acumulación de gas en el interior de un recinto cerrado puede ser resuelta en una primera instancia suponiendo que, en el instante inicial, una cierta región del espacio está ocupada por una mezcla inflamable de gas y aire que se enciende por un proceso que puede variar entre la deflagración y la detonación (Rigas and Sklavounos, 2005; Bjerketvedt et al., 1997). En principio, las variables más importante a tener en cuenta son la cantidad de energía total liberada por la explosión y el tiempo en el que esta energía es liberada. La liberación de esta energía produce un incremento súbito y localizado de la presión y la temperatura en la zona donde se inicia la explosión, lo que genera una onda de choque que se propaga por todo el recinto produciendo sobrepresiones muy importantes que pueden llegar a las varias decenas de atmósferas. La sobrepresión tiende a aliviarse por escape de gas y aire a través de las aperturas del recinto, hasta



Figura 1: Explosión característica en un horno

que eventualmente la presión interior se iguala a la exterior. Durante este lapso de tiempo, se producen cargas sobre la estructuras, que son las que finalmente causan el daño. En la práctica, resulta usual la instalación de *puertas contraexplosiones* las cuales actúan como válvulas de escape, cuando la presión interna excede de un cierto valor.

Dado que el tiempo durante el cual se desarrolla el proceso completo de la explosión demora normalmente menos de una décima de segundo, lo cual normalmente es menor que los tiempos característicos de la estructura, lo más importante como criterio de daño es la integral en el tiempo de la presión sobre las paredes de la estructura

$$\text{Criterio 1: } \int_0^{T_{\text{final}}} (p_{\text{wall}} - p_{\text{atm}}) dt, \quad (1)$$

y un segundo criterio que tiene en cuenta el aporte de las sobrepresiones positivas y negativas

$$\text{Criterio 2: } \int_0^{T_{\text{final}}} |p_{\text{wall}} - p_{\text{atm}}| dt. \quad (2)$$

La onda de choque producida por la explosión se propaga por el recinto y se refleja cuando choca contra las paredes.

Para las dimensiones usuales de una puerta contraexplosión, pequeña en comparación con las dimensiones del recinto, se debe observar que inicialmente existe poca influencia por la presencia de estas sobre el proceso de reflexión. Como consecuencia, los valores máximos de presión no son afectados apreciablemente. Sin embargo la presencia de la puerta y su ubicación sí afectan sensiblemente al tiempo y al desarrollo de las sobrepresiones a los que se ve sometida la estructura. Para los casos resueltos se presenta sólo el criterio de daño 1 debido a que las presiones interiores resultantes son siempre mayores que la atmosférica.

3. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES DE FLUJO COMPRESIBLE

La forma diferencial de la ecuación de conservación de masa, cantidad de movimiento y de energía total para flujos viscosos compresibles se escribe de la forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(\mathcal{F}^a)_i}{\partial x_i} = \frac{\partial(\mathcal{F}^d)_i}{\partial x_i} + \mathcal{G} \quad \text{en } \Omega \times (0, T_{\text{final}}], \quad (3)$$

donde Ω es el dominio cuyo contorno es Γ . $U = (\rho, \rho u, \rho E)^t$ es el vector de estados (incógnitas) expresado en las variables conservativas, ρ es la densidad y u la velocidad. E representa la energía total específica, \mathcal{F}^a considera los flujos advectivos, \mathcal{F}^d considera los flujos difusivos y \mathcal{G} se usa para los términos de las fuentes externas (por ejemplo, $\mathcal{G} = (0; \rho f_e; W_f + q_h)$, $W_f = \rho f_e u$ es el trabajo de las fuerzas externas f_e . Los flujos advectivos y difusivos se definen como

$$\mathcal{F}_i^a = \begin{pmatrix} \rho u_i \\ \rho u_1 u_i + \delta_{i1} p \\ \rho u_2 u_i + \delta_{i2} p \\ \rho u_3 u_i + \delta_{i3} p \\ \rho \mathcal{H} u_i \end{pmatrix} \quad \mathcal{F}_i^d = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{i1} \\ \tau_{i2} \\ \tau_{i3} \\ \tau_{ik} u_k - q_i \end{pmatrix}, \quad (4)$$

donde \mathcal{H} es la entalpía específica total definida en términos de la energía interna específica e y la energía cinética específica como: $\mathcal{H} = e + p/\rho + \frac{1}{2}|u|^2$. En las ecuaciones de los términos advectivos y difusivos, δ_{ij} es el tensor isotrópico de Kronecker de rango 2 (también denotado como \mathbf{I}), τ_{ij} son las componentes del tensor de tensiones viscosas de Newton: $\tau = 2\mu\epsilon(u) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)\mathbf{I}$. El tensor ϵ , tasa de deformación, es $\epsilon(u) = \frac{1}{2}(\partial_j u_i + \partial_i u_j)$. q_i es el flujo de calor definido de acuerdo a la ley de Fourier: $q_i = -\kappa \nabla T$ con κ la conductividad térmica y T la temperatura absoluta. Los coeficientes de viscosidad y conductividad térmica pueden ser modelados por la fórmula de Sutherland

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T_0 + 110}{T + 110}\right) \quad y \quad \kappa = \frac{\gamma R \mu}{(\gamma - 1) Pr}, \quad (5)$$

donde μ_0 es la viscosidad a la temperatura de referencia T_0 y Pr es el número de Prandtl (siendo $Pr = c_p \mu / \kappa$, donde c_p denota el calor específico a presión constante, μ el coeficiente de viscosidad, y κ la conductividad térmica). El modelo físico es cerrado por la definición de la ley constitutiva para la energía interna específica en términos del estado termodinámico y de algunas ecuaciones de estado para las variables termodinámicas; normalmente, se adopta una ley de gas ideal, entonces $\rho e = p(\gamma - 1) + \frac{1}{2}\rho \|u\|^2$ y $p = \rho R T$ donde $R = (\gamma - 1)c_v$ es la constante particular del gas, con $\gamma = c_p/c_v$ la relación de calores específicos a presión constante y volumen constante respectivamente, denominado exponente isoentrópico. Alternativamente, la ecuación de conservación de masa, momento y energía total en forma diferencial puede ser escrita en la forma casi lineal

$$\frac{\partial U}{\partial t} + A_i \cdot \frac{\partial U}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \cdot \frac{\partial U}{\partial x_j} \right) + \mathcal{G}. \quad (6)$$

Donde se considera que los vectores de flujo son sólo función de las variables de estado, por ejemplo, $\mathcal{F}^a = \mathcal{F}^a(U)$ y $\mathcal{F}^d = \mathcal{F}^d(U, \nabla U)$. Entonces, la divergencia de las funciones de los vectores de flujo pueden escribirse como

$$\frac{\partial \mathcal{F}_i^a}{\partial x_i} = \frac{\partial \mathcal{F}_i^a}{\partial U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x_i} = A_i \cdot \frac{\partial U}{\partial x_i} \quad y \quad \mathcal{F}_i^d = K_{ij} \cdot \frac{\partial U}{\partial x_j} \quad (7)$$

3.1. Formulación Variacional

Consideremos una discretización del dominio Ω por elementos finitos en subdominios Ω^e ($e = 1, 2, 3, \dots, n_{el}$). Basados en esta discretización, los espacios de las funciones de elementos finitos para las soluciones de prueba y para las funciones de peso, se definen, respectivamente como \mathcal{V}^h y \mathcal{L}^h . Estos espacios de funciones son elegidos como un subconjunto de funciones de $[H^{1h}(\Omega)]^{ndof}$ al tomar las condiciones de contorno de Dirichlet, donde $H^{1h}(\Omega)$ es el espacio funcional de Sobolev de dimensión finita sobre Ω , y $ndof$ es el número de grados de libertad en el problema continuo. La estabilización de la formulación por elementos finitos de la forma cuasi lineal de la ecuación (6), se escribe de la siguiente forma: Encontrar $U^h \in \mathcal{V}^h$ tal que para todo $W^h \in \mathcal{L}^h$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{W}^h \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_a^h}{\partial x_i} \right) d\Omega &= \int_{\Omega} \mathbf{W}^h \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{F}_d^h}{\partial x_i} + \mathcal{G} \right) d\Omega \\ \int_{\Omega} \mathbf{W}^h \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial t} + \mathbf{A}_i^h \frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial x_i} - \mathcal{G} \right) d\Omega &+ \int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{W}^h}{\partial x_i} \cdot \mathbf{K}_{ij}^h \frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial x_j} d\Omega - \int_{\Gamma_h} \mathbf{W}^h \cdot H^h d\Gamma + \\ + \sum_{e=1}^{nel} \int_{\Omega^e} \tau (\mathbf{A}_k^h)^T \frac{\partial \mathbf{W}^h}{\partial x_k} \cdot \left\{ \frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial t} + \mathbf{A}_i^h \frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{K}_{ij}^h \frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial x_j} \right) - \mathcal{G} \right\} d\Omega &+ \\ + \sum_{e=1}^{nel} \int_{\Omega^e} \delta_{shc} \frac{\partial \mathbf{W}^h}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}^h}{\partial x_i} d\Omega &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

donde las matrices A_i y K_{ij} son definidas como en la sección §3.

3.1.1. Cálculo del parámetro de estabilización y definición del término de shock-capturing

En el contexto de la formulación SUPG (streamline upwind/Petrov Galerkin), el tensor de tiempo intrínseco τ se define de la siguiente forma, $\tau = max[0, \tau_a - \tau_d - \tau_\delta]$, con cada τ_x definido como sigue (considerando los efectos advectivos y difusivos y evitando la duplicación del operador de shock-capturing y del operador SUPG):

$$\tau_a = \frac{h}{2(c + |u|)} I, \quad \tau_d = \frac{\sum_{j=1}^{n_{sd}} \beta_j^2 diag(K_{jj})}{(c + |u|)^2} I, \quad \tau_\delta = \frac{\delta_{shc}}{(c + |u|)^2} I \quad (9)$$

donde c es la velocidad del sonido, h es el tamaño del elemento calculado como la longitud del elemento en la dirección de las líneas de corriente y $\beta = \nabla \|U\|^2 / \|\nabla \|U\|^2\|$.

El término shock-capturing, presenta dos operadores: un operador isotrópico y un operador anisotrópico, ambos propuestos por Tezduyar (Tezduyar and Senga (2004)). Se define un vector unitario orientado con la dirección del gradiente de la densidad como $j = \frac{\nabla \rho^h}{|\nabla \rho^h|}$ y una longitud característica como $h = 2 \left(\sum_{a=1}^{n_{en}} |j \cdot \nabla N_a| \right)^{-1}$, donde N_a es la función de forma del elemento finito correspondiente al nodo a . Se define entonces el correspondiente operador shock-capturing isotrópico como

$$\delta_{shc} = \frac{h}{2} u_{char} \left(\frac{|\nabla \rho^h| h}{\rho_{ref}} \right)^{\beta^*}, \quad (10)$$

donde $u_{char} = |u| + c$ es la velocidad característica. ρ_{ref} es la densidad interpolada y β^* es un parámetro que puede tomarse como 1 o 2, de acuerdo a la agudeza (sharpness) de la discontinuidad

que se quiere capturar. La versión anisotrópica del termino de shock-capturing en la ecuación (8) es

$$\sum \int_{\Omega^e} \frac{\partial W^h}{\partial x_i} j_i \delta_{shc} j_k \frac{\partial U^h}{\partial x_k} d\Omega. \quad (11)$$

A la hora de decidir cuantas y cuales condiciones de contorno imponer, se presentan algunos problemas. Se corre el riesgo que las condiciones de contorno sean mayores o menores que las necesarias para el problema. Pero, imponer el número de condiciones de contorno correctas para el problema, no garantiza que las condiciones de contorno sean no reflectivas. Puede ocurrir que las ondas de choque, al llegar al contorno, se reflejen hacia el interior del dominio, generando condiciones que no son las que realmente ocurren en la realidad, y generando una distorsión en el flujo interior.

Al tratar con dominios infinitos deben introducirse condiciones de contorno tan lejanas a la región en la que se está realizando el análisis como sea posible. Las condiciones de contorno que tienden a dar la solución como si el contorno estuviese en el infinito, se llaman condiciones de contorno “absorbentes” o “no reflectivas”. Las condiciones de contorno absorbentes tienden a dar una mejor solución para las condiciones de contorno dadas en una cierta posición, o permiten imponer las condiciones de contorno más cercanas a la región de interés para un cierto error admisible. La ventaja de imponer las condiciones de contorno más cerca de la región de interés, está en la reducción del costo computacional que esto trae, ya que para un tamaño de malla dado, el número de nodos y elementos se reduce al reducirse el dominio de análisis. Con costo computacional nos referimos al tiempo de proceso de un dado problema, ya que estamos reduciendo el número de grados de libertad del problema y en consecuencia, el número de ecuaciones a resolver.

Por otro lado, algunas veces, el número de *características* entrantes o saliente puede cambiar durante el cálculo. Por ejemplo, en flujo compresible, es común que el flujo pase de supersónico a subsónico en ciertas partes de la salida del contorno. Esto puede ocurrir cuando, por ejemplo, se forma una onda de choque en una región cercana al contorno impuesto como salida, y ahí se hayan impuesto condiciones de frontera supersónicas por desconocer cómo será el comportamiento del flujo en esa zona. En este trabajo se impondrán condiciones de borde absorbentes desarrolladas por [Storti et al. \(2006\)](#).

4. TEST DE VALIDACIÓN Y CASOS PRÁCTICOS DE ANÁLISIS

La presente sección consta de tres partes. En la primera de ellas se resuelve, a los fines de poder validar el modelo numérico utilizado, un caso de prueba cuya solución analítica es conocida. La segunda parte presenta la resolución y análisis de una explosión en un recinto cerrado que posee una geometría rectangular. En una primera instancia, se considera que el recinto no posee puertas contra explosiones. En la segunda instancia, se le agregará puertas y se modificará la disposición, dimensiones y cantidad de las mismas, para poder llevar a cabo un análisis sobre la influencia de estas variables sobre los tiempos característicos de las cargas generadas por la distribución de presión interior al recinto. Finalmente, se resuelve una explosión en un geometría axisimétrica que tiene como fin representar un horno de destilación, de utilización típica en la industria petroquímica.

4.1. Propagación de una onda en un recinto cerrado

En esta primera parte se realiza un test para validar el programa. Esta prueba se lleva a cabo inicializando la presión en el recinto con los valores correspondientes a una onda plana, con las

siguiente características:

$$p = 1.1 + 0.1 \cos(\pi x/L) \quad (12)$$

Esta onda se propaga por el recinto cerrado. El análisis se basa en determinar en forma analítica el periodo de la onda y luego hacer una comparación con el resultante de la simulación. Para la onda propuesta el periodo se puede determinar mediante el siguiente cálculo

$$T = \frac{2L}{c_{ref}} = \frac{2L}{\sqrt{\frac{\gamma p_{ref}}{\rho_{ref}}}} = \frac{2 \cdot 6}{\sqrt{\frac{1.4 \cdot 1.1}{1}}} = 9.67s \quad (13)$$

Se puede observar una muy buena correlación entre este resultado analítico y el obtenido de graficar la evolución de las presiones en el tiempo obtenidas mediante la resolución numéricas de las ecuaciones antes mencionadas. En la Figura (2) se presenta la evolución temporal de la presión en varios puntos del dominio.

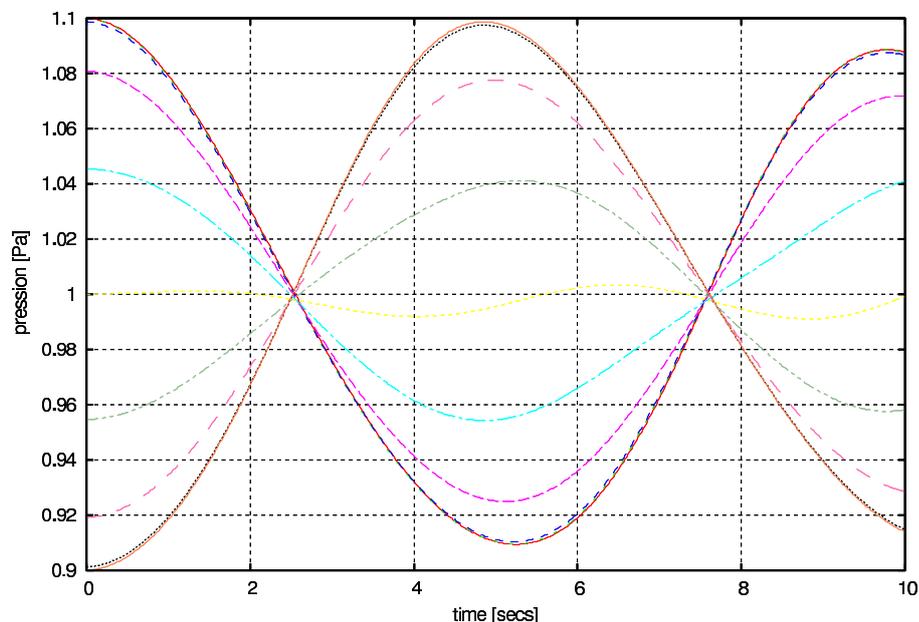


Figura 2: Evolución temporal de las presiones para condiciones iniciales correspondientes a una onda plana

4.2. Análisis de una explosión en una sala

Esta segunda parte consiste de un caso simple de análisis a fines de entender cuales son los tiempos característicos de dilución de la presión interior en un recinto sometido a una explosión y comprobar el efecto que tiene la ubicación de una puerta contra explosiones en la reducción del tiempo durante el cual la estructura estaría sometida a daño.

4.2.1. Modelado del Problema

La sala consiste de un dominio rectangular de 3 metros de alto por 6 metros de ancho. Se produce una explosión en su vértice inferior izquierdo, la cual es modelada por una zona esférica de radio $R = 0.5\text{m}$, centrada en la base o piso de la sala. Se considera que la intensidad de la explosión es tal que la presión en esa zona posee un valor inicial $p_{\text{blast}} = 200\text{atm}$, el cual se obtiene a partir de considerar que la explosión ocurre como una transformación a volumen constante en la que la liberación de la energía del material explosivo se produce instantáneamente. Los datos utilizados para realizar los cálculos son los siguientes:

$$Q = 9000\text{Kcal/m}^3 = 39\text{MJ/m}^3$$

$$\rho = 1\text{Kg/m}^3$$

$$c_v = R/(\gamma - 1) = 717\text{J/KgK}$$

Dada la falta de información sobre el gas que genera la explosión, a excepción de su calor latente, se considera que el resto de las propiedades del mismo se corresponden con las del aire.

El problema se modela considerando que el flujo es compresible y sin efectos viscosos importantes, lo cual reduce la complejidad de la simulación y el tiempo de cálculo. Además, se considera que el gas que se encuentra en el interior de la sala es aire, tanto en la zona que representa inicialmente a la explosión como en el resto del recinto.

Fuera de la zona de la explosión las condiciones para el aire son las correspondientes a $p = 1\text{atm}$ y $T = 293\text{K}$. El recinto se discretiza utilizando una malla estructurada de 100 elementos en la dirección horizontal y 50 elementos en la dirección vertical.

Las condiciones de borde del problema son las siguientes:

1. Condición slip o de velocidad normal nula sobre el piso, paredes laterales y techo del recinto (contornos sólidos).
2. Condición de borde absorbente en las posiciones correspondiente a las puertas contra explosión (Contorno abierto).

La Figura (3) muestra esquemáticamente la geometría utilizada y una configuración de puertas contra explosión.

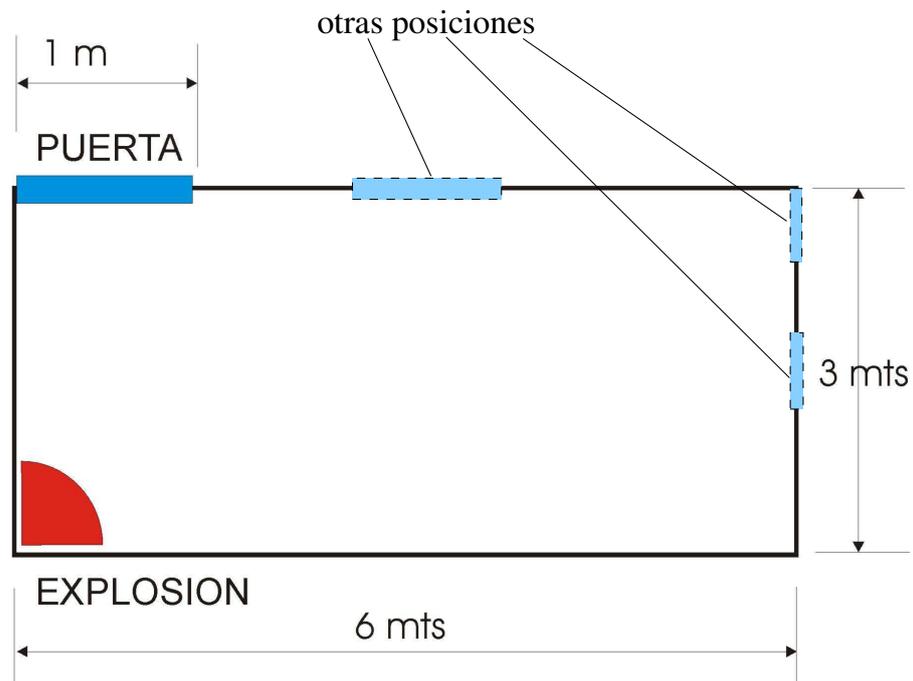


Figura 3: Croquis de la sala sometida a una explosión

Las figuras (4), (5), (6), (7), (8), (9) y (10) muestran la evolución temporal de la presión en varios puntos ubicados sobre el contorno de la sala, como así también los gráficos de evolución de la presión sobre las paredes, y ambos criterios de daño (gráficos en 2D y 3D), ecuaciones (1) y (2), para los siguientes casos de estudiado:

- a) Sala sin puertas,
- b) Sala con Puerta de 1m en el techo a la izquierda,
- c) Sala con Puerta de 1m en el techo al medio de la sala,
- d) Sala con Puerta de 1m en la pared derecha parte superior,
- e) Sala con Puerta de 1m en la pared derecha al medio de la sala,
- f) Sala con Puerta de 2m en el techo a la izquierda,
- g) Sala con 2 Puertas de 0.5m en el techo a la izquierda y en la pared derecha en la parte superior.

a) Sala sin puertas

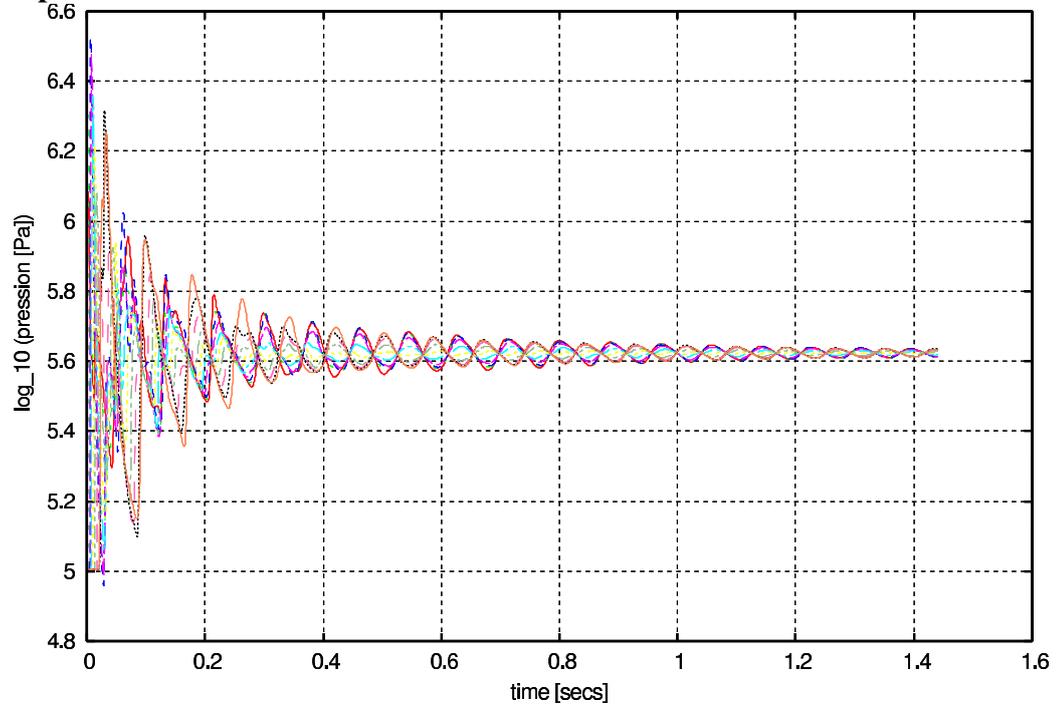
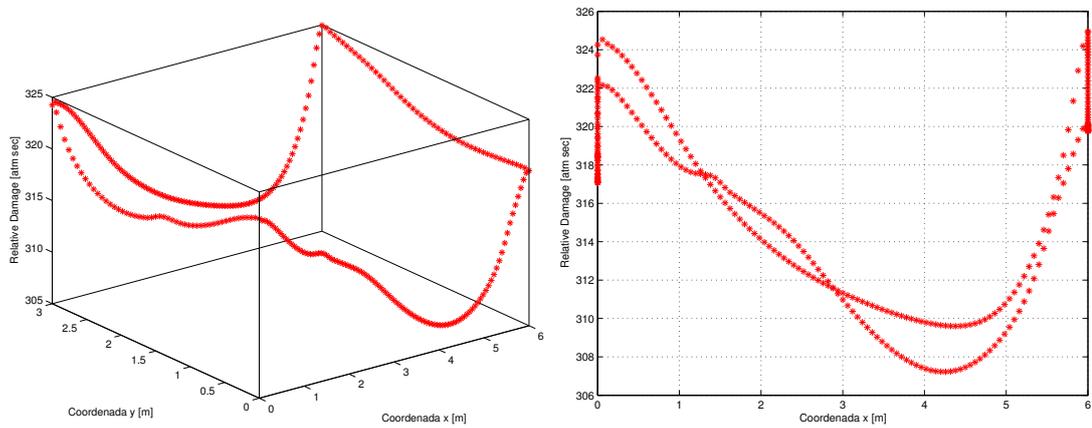


Figura 4: Historia de las sobrepresiones en las paredes de la sala



Daño relativo (Criterio 1) en 3D y su proyección 2D

b) Sala con Puerta de 1m en el techo a la izquierda

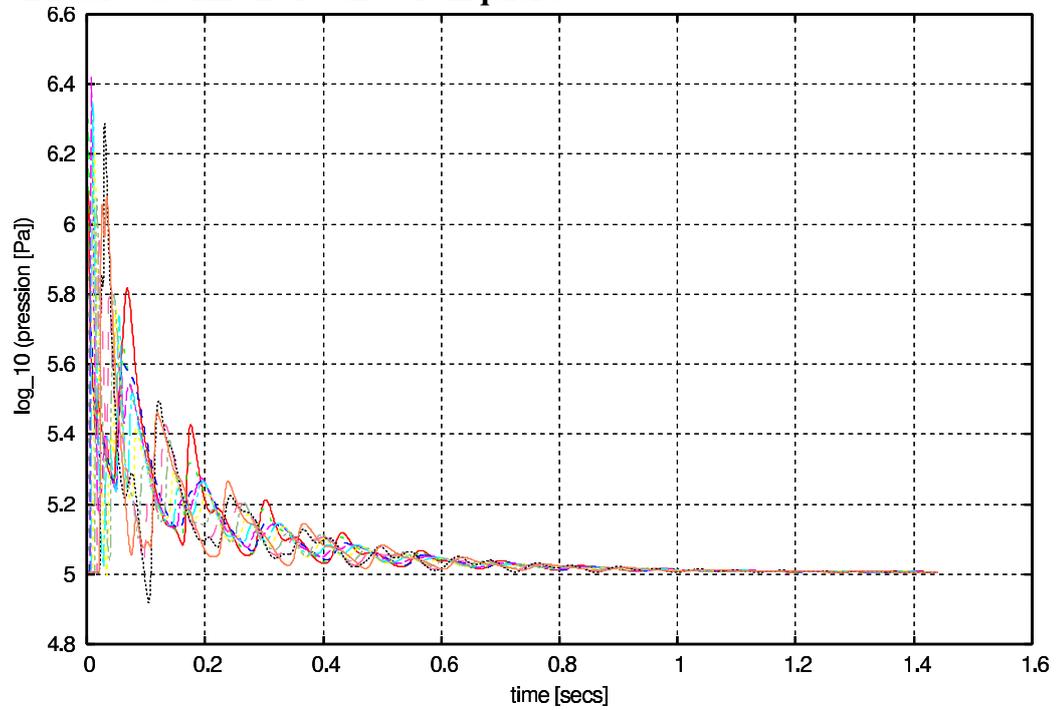
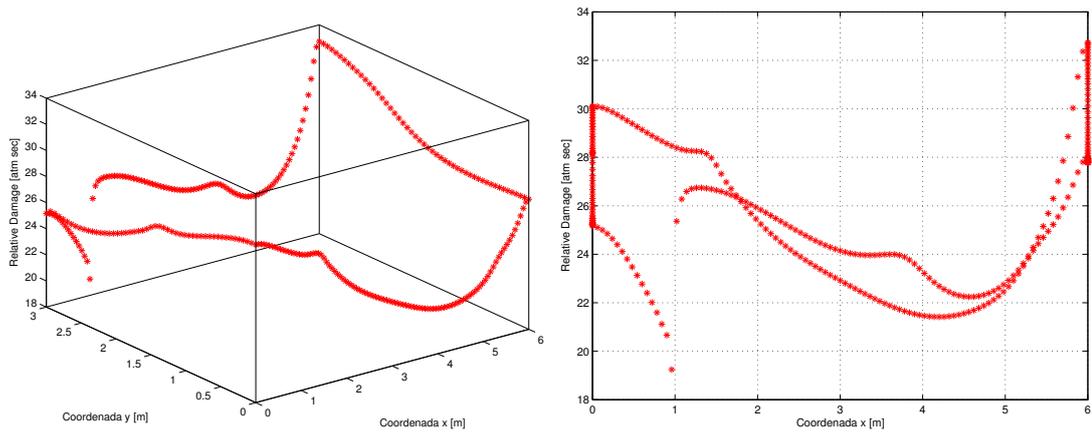


Figura 5: Historia de las sobrepresiones en las paredes de la sala



Daño relativo (Criterio 1) en 3D y su proyección 2D

c) Sala con Puerta de 1m en el techo al medio de la sala

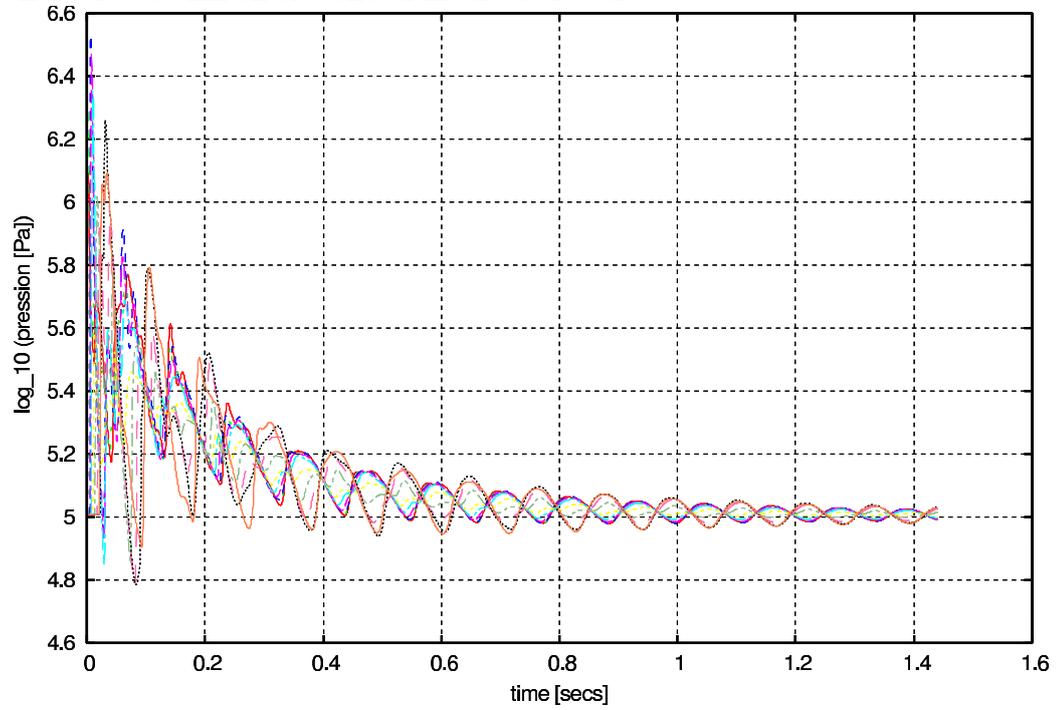
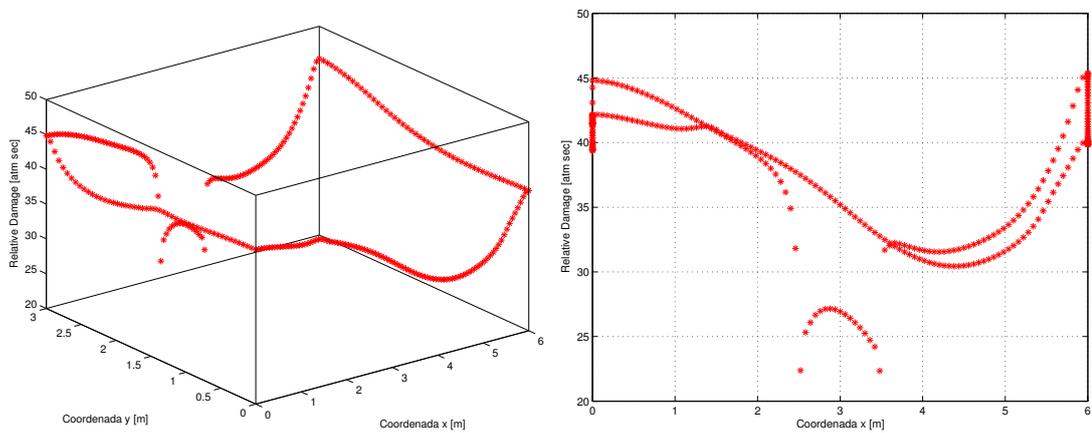


Figura 6: Historia de las sobrepresiones en las paredes de la sala



Daño relativo (Criterio 1) en 3D y su proyección 2D

d) Sala con Puerta de 1m en la pared derecha parte superior

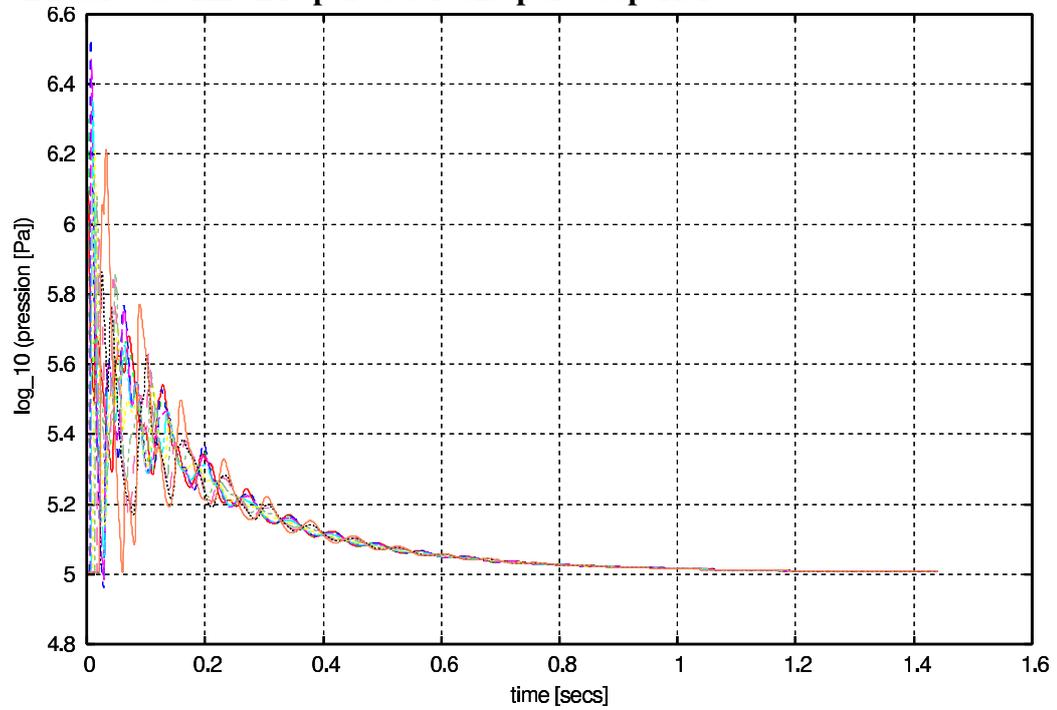
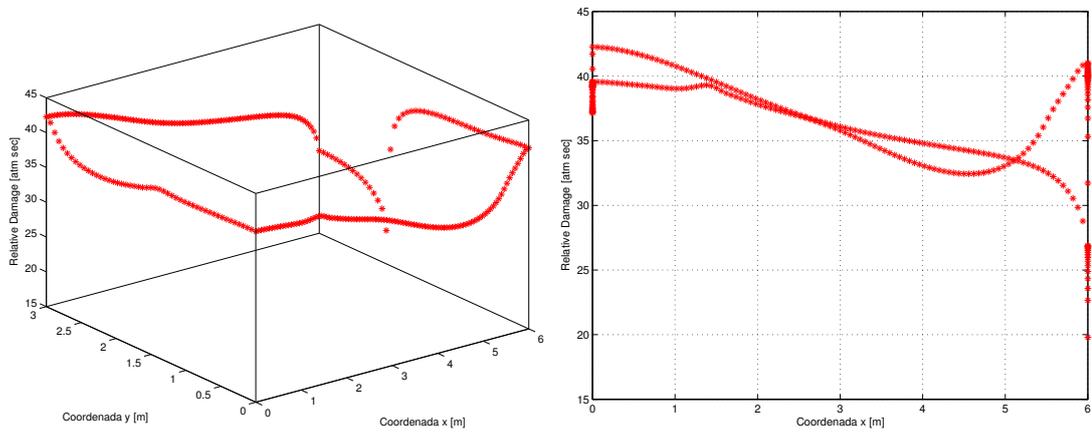


Figura 7: Historia de las sobrepresiones en las paredes de la sala



Daño relativo (Criterio 1) en 3D y su proyección 2D

e) Sala con Puerta de 1m en la pared derecha al medio de la sala

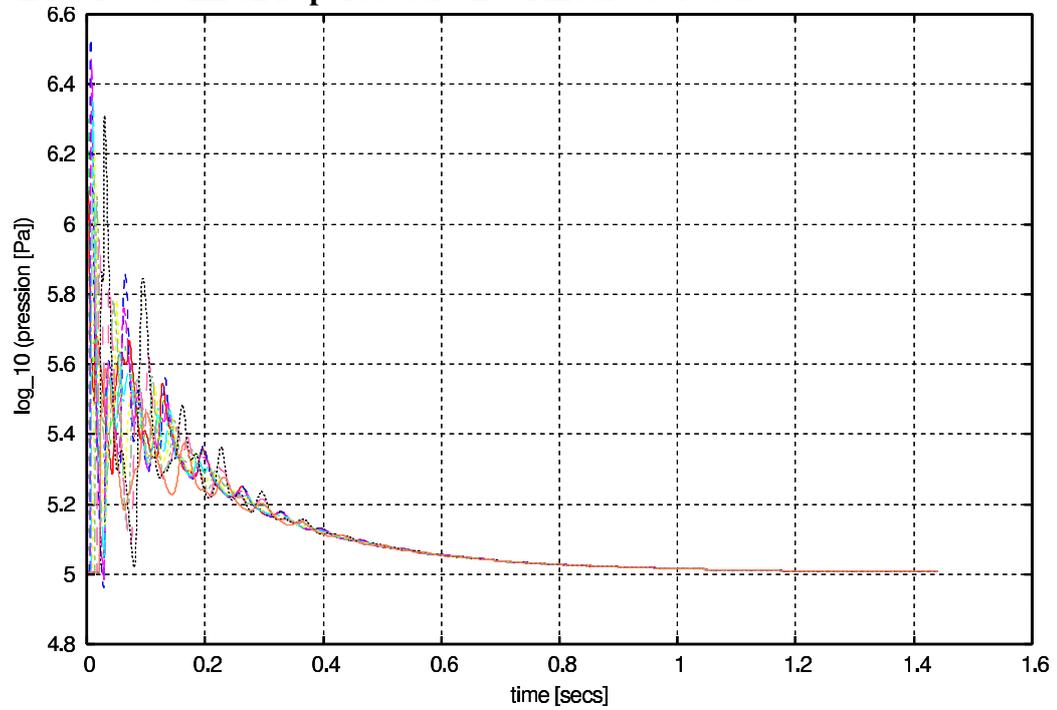
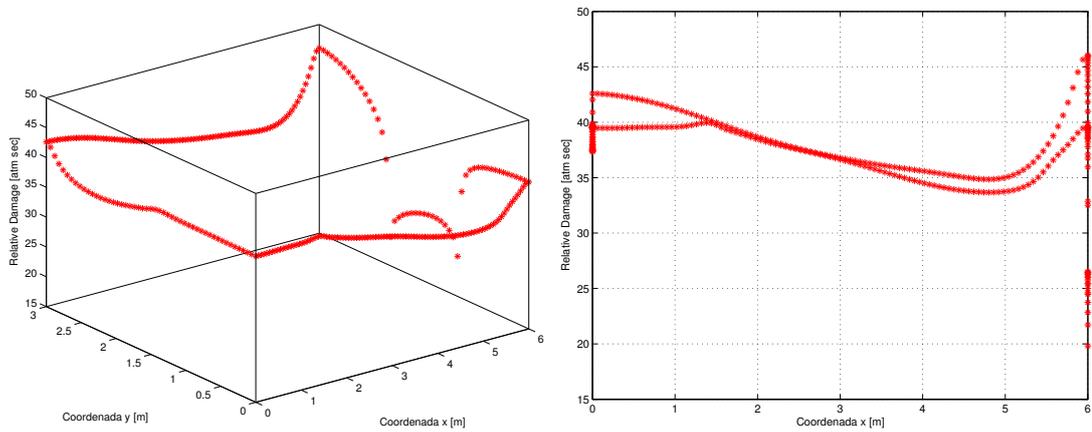


Figura 8: Historia de las sobrepresiones en las paredes de la sala



Daño relativo (Criterio 1) en 3D y su proyección 2D

f) Sala con Puerta de 2m en el techo a la izquierda

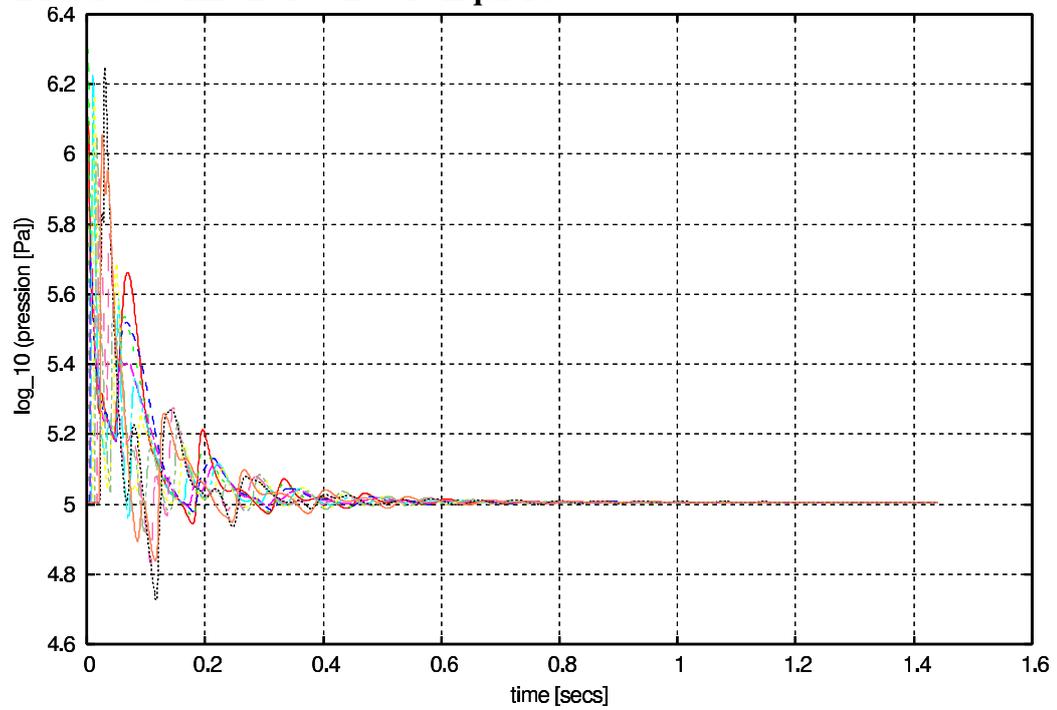
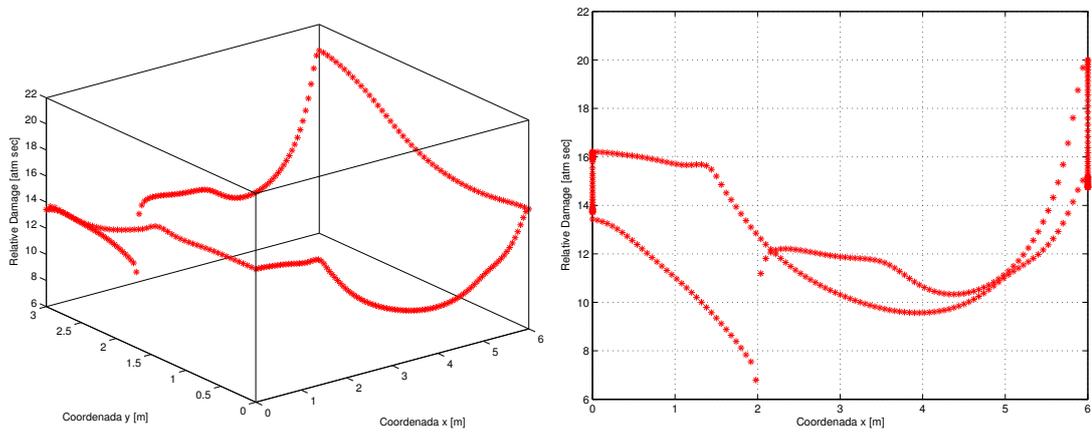


Figura 9: Historia de las sobrepresiones en las paredes de la sala



Daño relativo (Criterio 1) en 3D y su proyección 2D

g) Sala con 2 Puertas de 0.5m en el techo a la izquierda y en la pared derecha en la parte superior

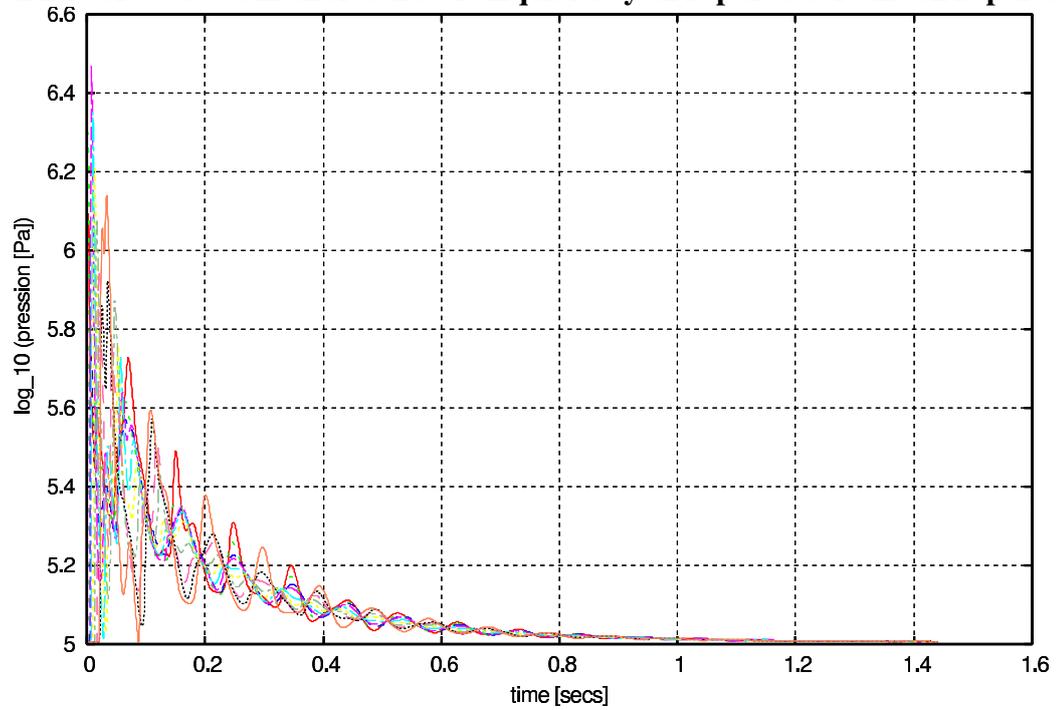
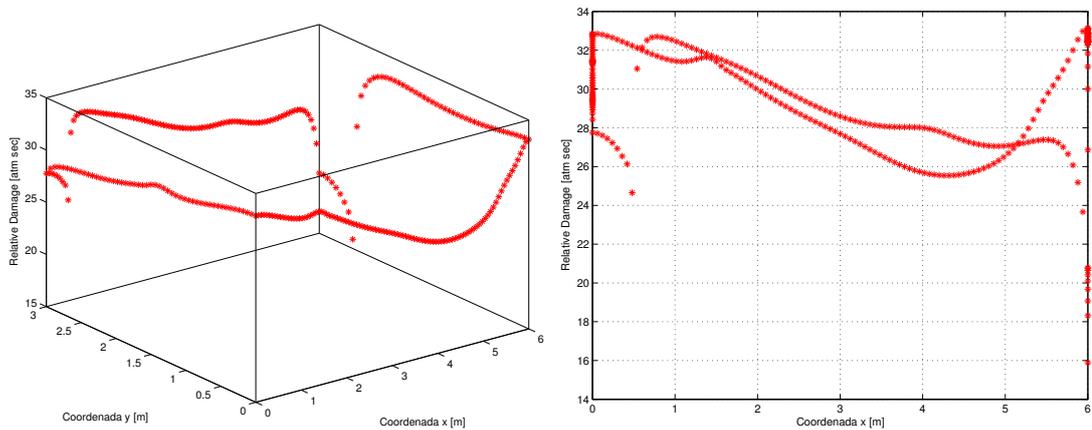


Figura 10: Historia de las sobrepresiones en las paredes de la sala



Daño relativo (Criterio 1) en 3D y su proyección 2D

En la Figura (4), correspondiente a la sala sin puertas, se observa que la envolvente de las presiones se amortigua en aproximadamente 1.2s a 1.4s, tendiendo a un valor final medio de la presión cercano a las 4atm. En la Figura (5), caso en el que la puerta se encuentra ubicada en el techo, sobre el mismo extremo de la sala en el que se origina la explosión, se comprueba que la envolvente de las presiones se amortigua en un lapso de tiempo de 0.6s, y el valor medio de la presión en la sala en ése instante es cercano a 1atm. Cuando la puerta se ubica en el medio del techo de la sala, Figura (6), la envolvente de las presiones se amortigua en un lapso de tiempo de 1.2s a 1.4s, con un valor medio de la presión en la sala de 1atm para ése instante. Si la puerta se ubica en la parte superior de la pared derecha (opuesta a la pared de sala en la que se origina la explosión), Figura (7), se observa un rápido amortiguamiento de la envolvente de la presión en 0.4s, pero su valor medio en ése instante es de 1.25atm. El valor medio de la presión en el interior del recinto recién alcanza un valor cercano a 1atm en 0.8s. En la Figura (8), correspondiente a la ubicación de la puerta en el medio de la pared derecha de la sala, se observa un comportamiento similar al caso de la Figura(7), aunque el amortiguamiento de la envolvente de la presiones se produce más rápido, el valor medio de la presión en la sala parece disminuir más lentamente respecto de ése caso. Si la puerta se dispone como en el caso b), pero se duplica su tamaño, Figura (9) el amortiguamiento se da en 0.6s y el valor medio de la presión se puede considerar de 1atm. Como es de esperar, la presión media en la sala disminuye mucho más rápido que en todos los demás casos. Finalmente, si se reemplaza la puerta de 1m por dos puerta de 0.5m y se disponen una de ellas sobre el foco de la explosión y la otra en la parte superior de la pared derecha, la Figura (10) permite observar que las oscilaciones se amortiguan en 0.8s y el valor de la presión media en la sala es de 1atm. Por lo tanto, se puede concluir que las disposiciones más convenientes en lo que respecta al amortiguamiento de la envolvente de las presiones son las d) o la e), mientras que la disposición más conveniente bajo el punto de vista de la disminución de la presión media es la f).

4.3. Horno de geometría simple

En esta sección se presenta la simulación del flujo generado por la explosión de gas en el interior de un horno de la industria petroquímica. La geometría del horno se presenta simplificada dada la etapa de análisis preliminar del estudio. Por lo tanto, se han omitido los detalles mecánicos y estructurales del horno, con lo cual se reduce también el costo computacional. Es decir que el análisis que se hace del problema es cualitativo.

La Figura (11) muestra la geometría simplificada utilizada. Es una geometría de revolución que consta de una pared lateral, el piso en la parte inferior y la boca de la chimenea del horno en la parte superior.

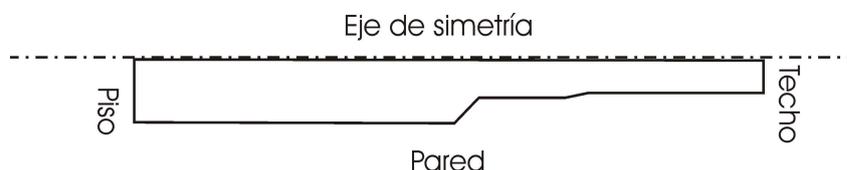


Figura 11: Geometría del Horno

El horno posee 3.49 metros de radio y una altura de aproximadamente 37 metros. Estas dimensiones son típicas de un horno de destilación empleado en la industria petroquímica.

4.3.1. Modelado del Problema

La explosión es modelada por una zona esférica de radio $R = 1.0\text{m}$, centrada en la base o piso del horno. Se considera que la intensidad de la explosión es tal que la presión en esa zona posee un valor inicial $p_{\text{blast}} = 200\text{atm}$, el cual se obtiene a partir de considerar que la explosión ocurre como una transformación a volumen constante en la cual la liberación de la energía del material explosivo se produce de manera instantánea. Los datos utilizados para obtener los valores iniciales son los mismos que aquellos correspondientes al problema de la sala.

Dada la falta de mayor información sobre el gas que genera la explosión, a excepción de su calor latente, se considera que el resto de las propiedades del mismo se corresponden con las del aire. El calor latente es el correspondiente a una mezcla de gases cuyo principal componente es gas butano.

Por otra parte, se considera que el flujo es compresible, sin efectos viscosos apreciables. Finalmente, se considera que el gas que se encuentra ocupando el interior del horno es únicamente aire. Fuera de la región ocupada inicialmente por la explosión, las condiciones para el aire son $p = 1\text{atm}$ y $T = 293\text{K}$.

Dada la geometría de revolución del horno, el problema se modeló en forma axi-simétrica, para lo cual se generó una malla de 24000 cuadrángulos en el plano, la cual es extrudada en sentido circunferencial por rotación del plano. Con ello, se obtiene una malla con igual cantidad de hexaedros. Si bien el problema del flujo no es axisimétrico, se decidió resolverlo de tal manera con el objeto de reducir el tiempo de cálculo. Esto no quita que el cálculo pueda realizarse en 3D, ya que el código CFD utilizado cuenta con esta capacidad.

Condiciones de borde periódicas: Como el problema se resuelve en forma axi-simétrica, se deben imponer restricciones sobre el estado de los nodos que se encuentran sobre el plano rotado. Las variables escalares (presión y densidad) poseen los mismos valores que en los nodos simétricos, mientras que la velocidad es afectada por la misma matriz de rotación que se utiliza para rotar la malla.

El resto de las condiciones de borde del problema son las siguientes:

1. Condición slip sobre el piso y las paredes laterales del horno.
2. Condición de borde absorbente en el extremo superior (abierto) del tubo.
3. Condición de simetría sobre el eje de axi-simetría del problema.

Análisis de resultados y modificación de las condiciones de borde para modelar la presencia de la puerta El análisis del problema comprende la detección de los patrones de ondas generados por la onda explosiva que viaja en el interior del horno. También se determina la evolución temporal de las presiones sobre las paredes y el fondo del horno.

Caso 1: Sin puerta contra explosión

La Figura(12) presenta la condición inicial para la presión, con el horno dispuesto horizontalmente. Para remarcar el contraste de los valores de presión, se grafica el logaritmo decimal de la presión expresada en kPa y la escala de colores se satura en el extremo de las presiones máximas. La zona inicial de la explosión se presenta de color rojo intenso mientras que la zona ocupada por el aire no perturbado es color violeta.

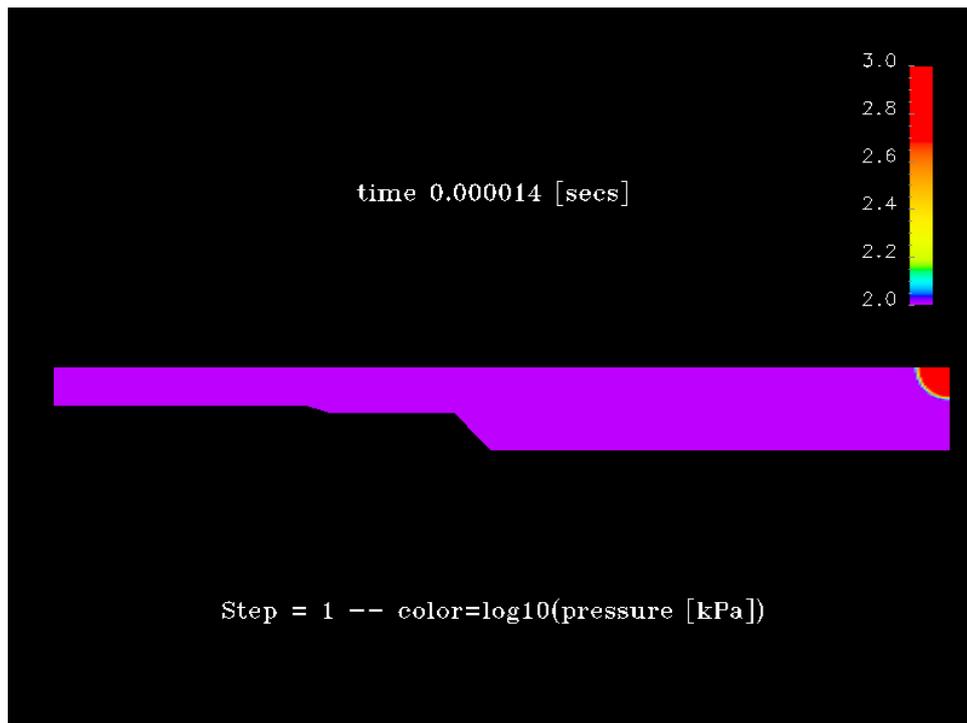


Figura 12: Condición Inicial

En la Figura(13) se presenta la distribución de presiones en todo el dominio 11 milisegundos posteriores al instante inicial. Se observa la presencia de la onda de choque que se genera por la explosión, impactando sobre la pared del horno. El choque viaja hacia el extremo superior del horno. Dado que no se consideran efectos viscosos u otro mecanismo de difusión, la intensidad de la onda se mantiene prácticamente constante en todo el proceso. Las presiones detrás de la onda de choque tienden a atenuarse levemente hasta que se alcanzan las contracciones en la parte superior del horno. La reflexión del choque en el contorno sólido de la primera contracción produce el aumento de presiones que se observa en la Figura(14), correspondiente a un instante de tiempo 40 milisegundos posterior al instante inicial.

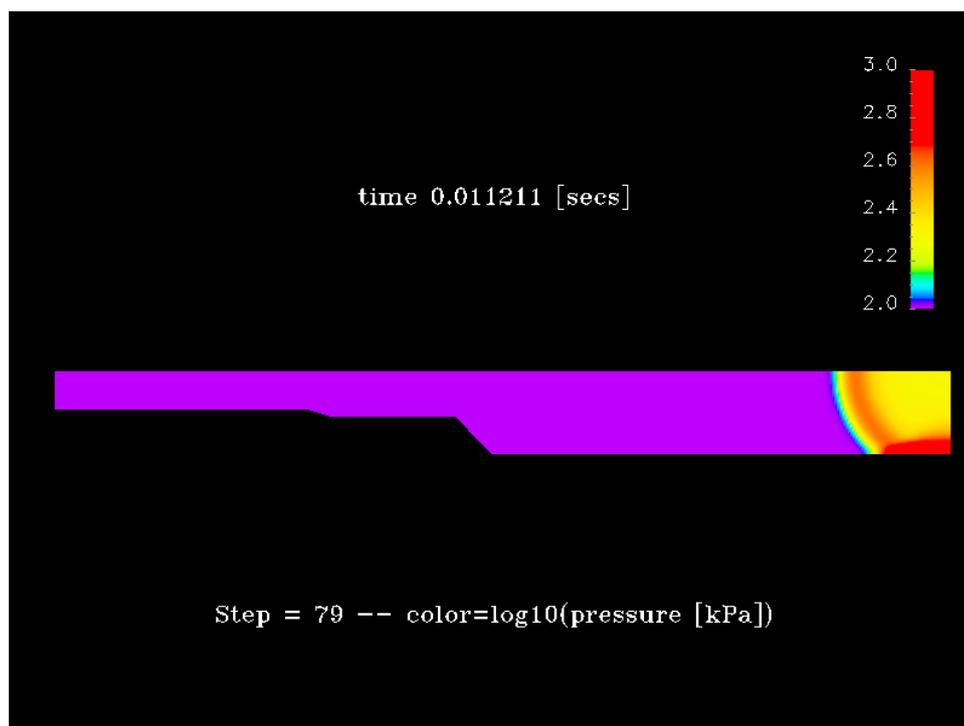


Figura 13: Impacto de la onda explosiva contra la pared en la base del horno para el caso sin puerta

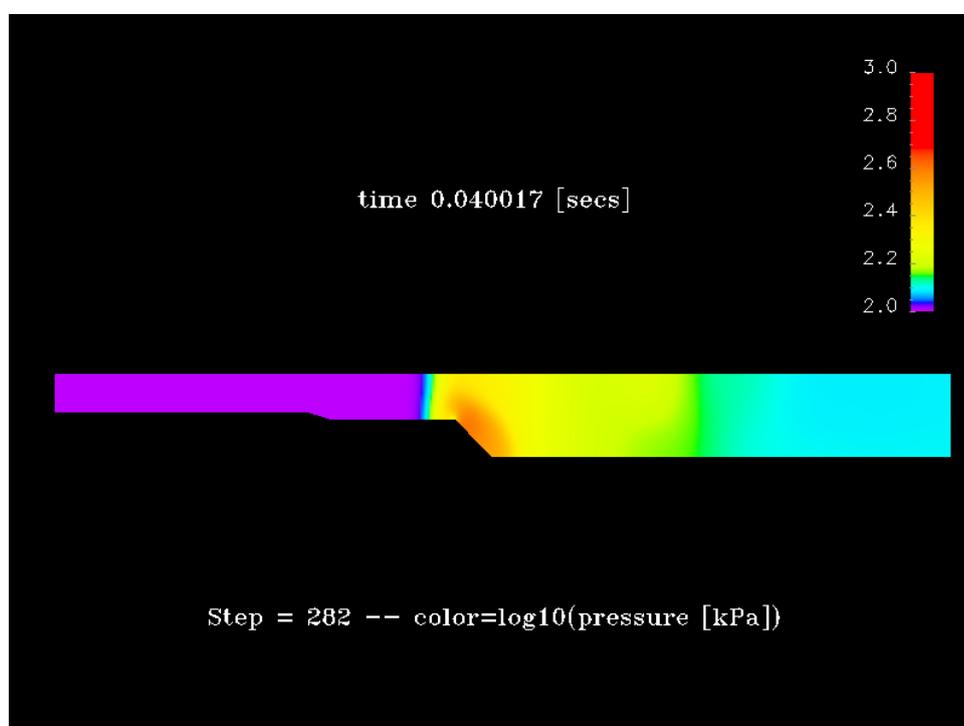


Figura 14: Impacto de la onda explosiva contra la pared del horno en el primer cambio de área para el caso sin puerta

Caso 2: Con puerta contra explosión ubicada en el piso

Luego de haber realizado la simulación de la explosión sin puerta y basados en el análisis del comportamiento de las presiones sobre las paredes, se procede a modelar la presencia de una puerta, ubicada en el lugar que se cree más conveniente a los efectos de poder reducir los daños causados por la alta presión. Se ubica una puerta de 1.0m de alto al ras del piso. Si bien se sabe que esto es poco viable desde el punto de vista de la seguridad del personal, se seleccionó esta posición porque se pensó que podía ser la más favorable en lo que tiene que ver con la disminución de la presión en el interior del horno. Se considera que la puerta ya se encuentra abierta en el instante que la explosión pasa por su posición (es decir que se considera que el tiempo de retardo en la apertura es nulo). Como el problema se resuelve en forma axi-simétrica, se está asumiendo implícitamente que la abertura de 1.0m recorre todo el perímetro del horno, con lo cual la superficie de apertura es de $2 * \pi * R * H$, siendo R el radio del horno en la zona donde se ubica la puerta y H la altura de la puerta.

La puerta se modela imponiendo una condición de borde absorbente en ése segmento del contorno, con un estado de referencia dado por las condiciones en el exterior del horno.

Como se observa en las figuras(12), (13), (14), la onda en su avance somete a las regiones próximas al frente a la intensidad de presión que se establece en los primeros instantes de la explosión a menos de variaciones por cambio geométricos, por ejemplo contracciones como en los cambios de área. Esta sollicitación es imposible de disminuir utilizando puertas contra explosiones y lo que se debe procurar es que el choque salga del horno lo más rápido posible, generando la menor cantidad posible de reflexiones. Se debe tener en cuenta que la onda de choque sale por el extremo superior del horno en menos de 0.08 segundos. Dado que la altura del horno es casi 40.0m, esto nos indica que la onda ha viajado a una velocidad promedio de aprox. 500m/s. Para cuantificar la diferencia en las sollicitaciones que experimentan las paredes del horno debido a las altas presiones, la Figura (15), muestra la historia de la presión sobre determinados puntos de la pared.

En el caso en el que no hay puerta contra explosión se observa que la presión media sobre distintos puntos de la pared posee valores superiores a 1.5 atmósferas, y que la atenuación de dicho valor medio ocurre muy lentamente. Algo similar ocurre con el amortiguamiento de la amplitud de la envolvente de las presiones.

Por otro lado, la Figura(16) muestra lo que sucede cuando se agrega la puerta contra explosión al ras del suelo. Se observa que en menos 0.5s la presión media sobre las paredes se redujo a un nivel menor que aquél alcanzado en el horno sin puertas. El amortiguamiento de la envolvente de las presiones también se presenta en el mismo tiempo. Para ése instante, el valor de la presión media en el interior del horno es de 1atm. El análisis del daño causado sobre la estructura es equivalente al mostrado con mayor detalle en el ejemplo de la sala section §4.2.

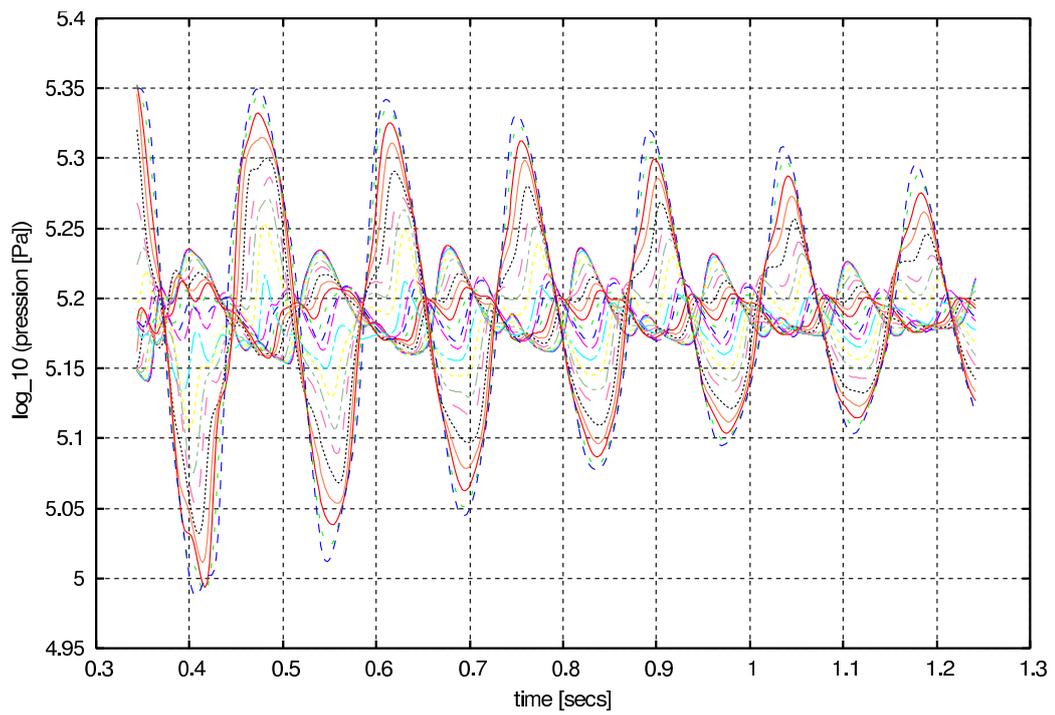


Figura 15: Presión sobre las paredes del horno en función del tiempo para el horno sin puertas contra explosiones

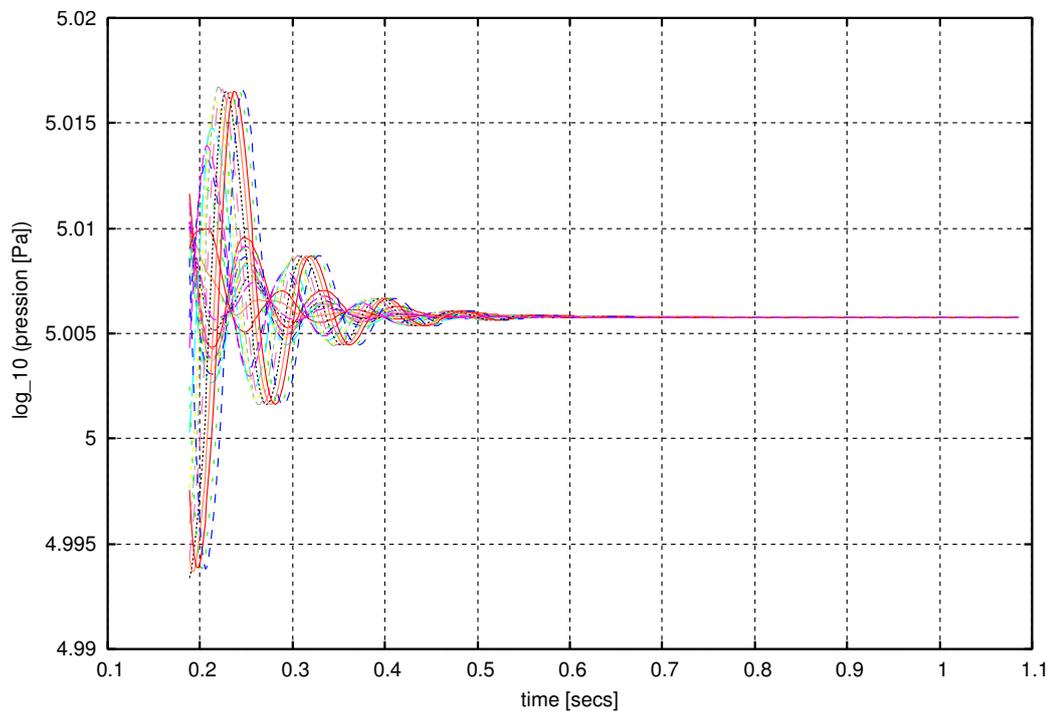


Figura 16: Presión sobre las paredes del horno en función del tiempo para el horno con una puerta contra explosiones al ras del suelo.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los casos anteriores se concluye que resulta factible simular, con la actual herramienta computacional, una explosión en tiempos razonables siempre que la geometría esté simplificada. Por otra parte, se cree que será de gran interés extender el estudio y el resolver el problema en forma tridimensional en vez de axisimétrica. En tal caso, los detalles del interior del horno que no sean relevantes para una simulación preliminar permanecerán simplificados. Al respecto de las simulaciones obtenidas, se concluye que la intensidad inicial de la onda se ve levemente reducida por la propia expansión de la explosión adentro del horno. La onda de choque generada por la explosión viaja a velocidad supersónica, sometiendo a la estructura a niveles muy altos de presión que duran un intervalo de tiempo del orden de la centésima de segundo y la modificación de las alteraciones aguas abajo de la onda producidas por la presencia de las puertas contraexplosiones no logran atenuar la intensidad del choque. Sin embargo, tanto el tiempo en el cual se atenúa la presión media final como aquél en el que se produce el amortiguamiento de la amplitud de las ondas reflejadas que permanecen en el interior del horno sí dependen de si el horno tiene o no puertas contra-explosiones y de sus ubicaciones. Desde la perspectiva del daño estructural, se debe considerar la carga generada por la presión en el tiempo que surge de este análisis y comparar con la normativa existente para ver si estos niveles de sollicitación están del lado de la seguridad o si se requieren varias puertas para lograr esta condición.

Si se piensa en un recinto cerrado, sin aperturas, una vez producida la explosión la onda de choque se reflejará sucesivamente sobre las paredes del recinto hasta que en el límite quedará una pequeña oscilación acústica montada sobre un estado medio del gas. En estas circunstancias, la mejor ubicación de la puerta para amortiguar este modo acústico es donde el modo tiene su mayor amplitud. Por ejemplo en el caso de un recinto elongado, la mejor ubicación es cerca de los extremos y la peor es en el medio donde el modo de oscilación tiene amplitud nula. Extrapolando este razonamiento, un criterio heurístico para ubicar las puertas es simular la explosión y ubicar el punto donde se producen la mayor amplitud de presiones en el tiempo. En el caso de querer ubicar varias puertas, se van ubicando una a una, poniendo la siguiente en el punto de máxima amplitud que se obtiene con las anteriores ya posicionadas. Si bien este criterio puede no ser el óptimo es un buen punto de partido para un proceso de optimización sobre las posiciones de las puertas.

Como trabajos a futuro se prevee la incorporación de un modelo de interacción fluido estructura para poder evaluar con otros criterios más precisos el daño causado por la explosión sobre la estructura del horno. También se piensa utilizar un código para realizar adaptatividad de malla, con lo que se cree se mejorará la calidad de la solución fluido-dinámica, reduciendo a su vez el costo computacional. Además, se desea resolver el problema del horno en forma tridimensional en vez de axi-simétrica, aumentando el grado de detalle de las estructuras que constituyen el horno.

Se prevee que estos cálculos demandarán una gran cantidad de recursos computacionales ya que, como en cualquier proceso de optimización involucran una serie de simulaciones para cada geometría.

REFERENCIAS

- Bjerketvedt D., Bakke J., and Van Wingerden K. Gas explosion handbook. *Journal of Hazardous Materials*, 52:1–150, 1997.
- Rigas F. and Sklavounos S. Experimentally validated 3-D simulation of shock waves generated by dense explosives in confined complex geometries. *Journal of Hazardous Materials A*, 121:2330, 2005.

- Storti M., Nigro N., and Paz R. Dynamic boundary conditions in Computational Fluid Dynamics. *Journal of Computational Physics*, 2006. (submitted).
- Tezduyar T. and Senga M. Determination of the shock-capturing parameters in supg formulation of compressible flows. In T.U.P.. Springer-Verlag, editor, *Computational Mechanics WCCM IV, Beijing, China 2004*. 2004.