

## Simulación numérica de explosiones en calderas: Pautas para la distribución de planta como medida de mitigación de daños

### Simulação numérica de explosões de caldeiras: Diretrizes para projetos de instalações como medida de mitigação de danos

#### *Numerical Simulation of Boiler Explosions: Guidelines for Plant Layout as a Damage Mitigation Measure*

Ricardo Alberto Morales-Vargas

Departamento de Salud Ambiental - Escuela de Tecnologías en Salud, Facultad de Medicina, Universidad de Costa Rica.

**Cita:** Morales-Vargas RA. Simulación numérica de explosiones en calderas: Pautas para la distribución de planta como medida de mitigación de daños. Rev. salud ambient. 2020; 20(2):137-149.

**Recibido:** 1 de marzo de 2020. **Aceptado:** 16 de septiembre de 2020. **Publicado:** 15 de diciembre de 2020.

**Autor para correspondencia:** Ricardo Alberto Morales-Vargas.

Correo e: ricardomoralescr@yahoo.com

Escuela de Tecnologías en Salud. Facultad de Medicina. Universidad de Costa Rica.

**Financiación:** No se ha contado con financiación para el desarrollo de este trabajo.

**Declaración de conflicto de intereses:** El autor declara que no existen conflictos de intereses que hayan influido en la realización y la preparación de este trabajo.

**Declaraciones de autoría:** Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo todos los autores aprobaron la versión final.

### Resumen

En diversos países las explosiones en calderas han generado daños serios y costosos por destrucción de sitios de trabajo y accidentes de trabajadores, los que van desde quemaduras, laceraciones, hasta la muerte. La causa principal de explosiones en calderas es por bajo nivel de agua, generándose recalentamientos en los tubos, vaporización súbita, elevación de la presión y fallo catastrófico. Este artículo hace una revisión de los requisitos técnicos en la normativa hispanoparlante para la operación segura de calderas, enfocándose en la correcta ubicación y distanciamiento del cuarto de calderas, considerando el riesgo mayor: la explosión de una caldera. Se comparan los hallazgos de la normativa latinoamericana con otra legislación internacional. Se analizan daños potenciales, tomándose casos-tipo de explosiones para los tamaños de caldera comunes de un fabricante líder, y usuales en Latinoamérica, según experiencia del autor. La sobrepresión máxima resultante se calculó como función de la distancia estimándose el daño de la onda de choque, para recomendar la ubicación ideal o mejorada del cuarto de calderas, minimizando el daño de explosiones y quemaduras de vapor de agua. Se estimaron "distancias seguras" mínimas entre la caldera y otras estructuras y equipos, protegiendo a seres humanos de la sobrepresión. Se muestra la utilidad de modelos simples de sobrepresión-distancia, junto con modelos Probit, en relación con modelos más complejos de dinámica de fluidos y cálculos estructurales de elementos finitos. Se propone que el análisis obligatorio de las consecuencias, utilizando modelos numéricos similares o más complejos, se incorpore en la legislación latinoamericana e internacional para guiar la distribución de la planta.

**Palabras clave:** calderas; explosión; evaluación de peligros; análisis de peligros; riesgos; regulación; evaluación de riesgos; análisis de riesgos.

### Resumo

Em vários países, as explosões de caldeiras geraram danos sérios e dispendiosos devido à destruição de locais de trabalho e lesões nos trabalhadores, que vão desde queimaduras e lacerações até a morte. A principal causa de explosões de caldeiras deve-se aos baixos níveis de água, gerando superaquecimento nos tubos, vaporização repentina, aumento de pressão e falha catastrófica. Este artigo faz uma revisão dos requisitos técnicos nos regulamentos de língua espanhola para a operação segura de

caldeiras, focando-se na localização e distância corretas da sala da caldeira, considerando o maior risco: a explosão de uma caldeira. As conclusões das regulamentações latino-americanas são comparadas com outras legislações internacionais. Foram analisados potenciais casos típicos de explosão de caldeiras, usando tamanhos de caldeiras comuns na América Latina de um fabricante líder, segundo a experiência do autor. A sobrepressão máxima resultante foi calculada em função da distância estimando o dano da onda de choque, para recomendar a localização ideal ou melhorada da sala da caldeira, minimizando o dano de explosões e queimaduras por vapor de água. Foram estimadas "distâncias seguras" mínimas entre a caldeira e outras estruturas e equipamentos, protegendo os seres humanos da sobrepressão. É demonstrada a utilidade de modelos simples de sobrepressão-distância, juntamente com modelos Probit, em relação a modelos mais complexos de dinâmica de fluidos e cálculos estruturais de elementos finitos. Propõe-se que a análise obrigatória das consequências, utilizando modelos numéricos semelhantes ou mais complexos, seja incorporada na legislação latino-americana e internacional para orientar os projetos de instalações industriais.

**Palavras-chave:** caldeiras; explosão; avaliação de perigos; análise de perigos; riscos; regulação; avaliação de riscos; análise de riscos.

### Abstract

Boiler explosions in various countries have caused costly, serious damage to workplaces and injuries to employees ranging from burns and lacerations to death. The main cause of boiler explosion is a low water level, which causes overheating of the boiler tubes, leading to sudden vaporization, an increase in pressure, and catastrophic failure. This article reviews the technical requirements for the safe operation of boilers in the regulations of Latin American countries, focusing on the correct location and distancing of the boiler room according to the major hazard the explosion of the boiler. Current location requirements in Latin America are compared to those in other international legislations. In addition, potential damages are analyzed according to standard explosion cases for common boiler sizes in Latin America and from a leading manufacturer and to the author's experience. The resulting peak overpressure was calculated for these cases as a function of distance, the damage of the shock wave being estimated in order to recommend an ideal or improved boiler room location to thus minimize the damage from explosions and the severity of water vapor burns. Minimum "safe distances" between the boiler and other structures and equipment were estimated to also protect human beings from overpressures. The usefulness of simple distance-overpressure models in combination with Probit models is discussed in relation to more complex models of fluid dynamics and finite-element structural calculations. It is proposed that mandatory analysis of consequences, using similar or more elaborate models, be incorporated in Latin American and other international legislations and used to guide plant layout.

**Keywords:** boilers; explosion; hazard assessment; hazard analysis; risks; regulation; risk assessment; risk analysis.

## INTRODUCCIÓN

Las calderas, sean estas de combustibles fósiles, biomasa, biocombustibles o combustibles alternos, alcanzan durante su operación normal temperaturas y presiones que pueden presentar serios riesgos a los operarios, otro personal de planta y a equipos adyacentes, tanto en ambientes industriales, comerciales y servicios, así como institucionales. De ahí que sea necesario contar con un estricto marco de seguridad para su operación; que contemple desde la planificación del proyecto, ubicación y distanciamiento del cuarto de calderas, construcción, la puesta en marcha, la operación normal de la misma, así como aspectos de capacitación, mantenimiento, inspección, almacenaje y su retiro de la instalación. Existen bancos de datos tabulados por diversas agencias<sup>1</sup> que indican que los fallos en calderas tienen una frecuencia de 0,9-4,0 fallos/año, lo que genera limitaciones a la fiabilidad y seguridad de la operación de las empresas. En particular los fallos en válvulas de alivio se estiman en 0,03-0,08 fallos/año, y los controladores de nivel entre 0,03 y 2,0 fallos/año. Otra causa común de explosiones se da por acumulación de combustibles en los tubos u hornos, liberándose súbitamente la

energía de la combustión, pero usualmente generando daños solamente internos a la caldera, cañón de fuego, tubos, ladrillos refractarios, pero sin sobrepasarse los límites constructivos del equipo que contiene la presión operativa del lado de agua, por lo que no se analizan en el presente estudio.

Estos aspectos, que contribuyen al fallo catastrófico de calderas, se vuelven de importancia crítica al tratarse de equipos para generación térmica de energía, cuyas presiones son aún más altas<sup>2</sup>. Así, algunos investigadores y empresas consultoras para el sector petroquímico han desarrollado estudios y guías para la ubicación de equipos industriales, de modo que se controlen dichos riesgos<sup>3-7</sup>; sin embargo, estos no son recogidos en las regulaciones oficiales, por ejemplo del *National Board of Pressure Vessel Inspectors*<sup>8</sup> de los EEUU, ni la normativa NFPA 85<sup>9</sup>, o la normativa comunitaria europea<sup>10</sup>, las más utilizadas a nivel global.

Hay numerosos ejemplos de explosiones de calderas por bajo nivel de agua, y es práctica usual en la ingeniería la investigación y análisis de estos accidentes, desde inicios de la revolución industrial<sup>11</sup>. Datos estadísticos

publicados por el *National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors*<sup>12</sup>, correspondientes al 2002, indican que el 85 % de los accidentes son atribuibles a dos causas; bajo nivel de agua (49 %); y error en la operación o mantenimiento deficiente (36 %). El reporte menciona además que, con índices mucho menores, figuran los accidentes asociados a deficiencias en el diseño y fabricación, fallas en los controles y los quemadores, instalación inadecuada, fallas en válvulas de seguridad y reparaciones inadecuadas. Tan solo entre 1992-2001 se dieron en promedio 2 334 accidentes/año, con un total de 127 muertes. El promedio de lesiones en relación con los accidentes es de un lesionado cada 32 accidentes<sup>13</sup>. En el año 2002 se produjeron 1487 accidentes en calderas de generación de energía, producción de vapor y agua caliente, causando en los EEUU 16 heridos y 3 muertes<sup>12</sup>.

Un análisis de una empresa consultora radicada en Chile<sup>14</sup> sugiere en dicho país, que de existir un registro de dichos accidentes, el análisis brindaría resultados con una distribución similar; y en cuanto a la segunda causa, relacionada con operación/mantenimiento deficiente, la publicación destaca la importancia de vigilar el tratamiento químico del agua de caldera. En la región de Latinoamérica, en el primer semestre del 2020 se reportaron 9 accidentes, con un deceso y 12 lesionados<sup>15</sup>.

Publicaciones del *American Society of Power Engineers*<sup>16</sup> y del Estado de Tennessee<sup>17</sup> apuntan a que una explosión en una caldera operando a 150 psi, puede generar lesiones serias a operarios, generar ruptura y desplazamiento del equipo de decenas de metros, con el consiguiente daño material a estructuras. Otra causa fundamental de accidentes indicada en estas publicaciones es que se introduzca agua de alimentación más fría, durante la operación con bajo nivel de agua, y su vaporización súbita cause la sobrepresión destructiva<sup>16,17</sup>.

La estimación usual de estas consecuencias a seres humanos y equipos corresponde a modelos BLEVE; una expansión isoentrópica, cercana a la presión atmosférica; y que han sido utilizados a través de los años<sup>3,4,18-22</sup>. El Gobierno Holandés ha publicado el *Yellow Book*<sup>23</sup>, donde presenta los dos grandes tipos de modelos para el cálculo de la energía liberada en explosiones: a) Métodos de equivalentes en TNT; y b) Métodos que se relacionan con el comportamiento diferenciado de las nubes de vapores explosivos o los llamados métodos multienergía, y más dependientes de la geometría y grado de confinamiento de la nube que genera la sobrepresión.

El presente trabajo se basa en el primer grupo de estos, y permite modelar a partir de principios termodinámicos básicos la energía de una explosión BLEVE, aplicable a calderas<sup>22</sup>, el que traduce a su equivalente de TNT, a fin de calcular las sobrepresiones generadas, utilizando las

correlaciones de sobrepresión y distancia escalada<sup>19,24-26</sup> junto con modelos Probit para la estimación de la probabilidad de sufrir consecuencias por distintos efectos como ruptura de tímpanos, hemorragia pulmonar y daños por impactos de fragmentos<sup>1,6,7,22,27,28</sup>, de manera similar a como se plantea por el Gobierno Holandés en su *Green Book*<sup>29</sup>. Modelos de más reciente desarrollo, combinan estas premisas con modelos computacionales para dinámica de fluidos y modelos numéricos para estructuras<sup>3,28,31-33</sup>, lo que ha permitido modelar el efecto rebote o dominó<sup>6,34,35</sup> y optimizar la distribución de planta<sup>35</sup>.

En este trabajo se hace además una revisión de los requisitos técnicos en la normativa de países hispanoparlantes para la operación segura de calderas, enfocándose en la correcta ubicación y distanciamiento del cuarto de calderas, considerando el riesgo mayor; en este caso la explosión de una caldera. Se analizan casos-tipo de explosiones potenciales, a la luz de los tamaños de caldera más usuales en Latinoamérica, se calcula la sobrepresión y daño de la onda expansiva, para así recomendar la ubicación idónea en planta, con base en los efectos resultantes, minimizando así los daños por explosiones y quemaduras por vapor de agua. Se espera los resultados sean de interés para el sector industrial, comercial y de servicios, incluyendo el institucional-sanitario donde estos equipos son usados en hospitales, clínicas y centros de servicios como esterilización y lavanderías.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en dos fases: una primera fase de revisión bibliográfica para analizar la normativa internacional, consultándose las normas de Chile, España, México, Colombia, Costa Rica y los EEUU; y sus recomendaciones en cuanto a ubicación de calderas, así como una publicación sobre avances reglamentarios en los países líderes en la región latinoamericana<sup>15</sup>; y la segunda fase (a fin de contrastar con los resultados de la primera) de carácter investigativa-cuantitativa, en la que se modeló las explosiones de calderas considerando estas como una rotura dúctil en la que se da, en cuanto al vapor, una expansión isoentrópica (a causa de la velocidad a la que se produce y que el vapor se comporta como un gas ideal).

Así, la energía liberada por una expansión isoentrópica para un gas ideal se expresa según la siguiente ecuación de la termodinámica:

$$Ev = 10^2 * \left[ \frac{P * V}{\gamma - 1} \right] * \left[ 1 - \left( \frac{Pa}{P} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right] \quad (1)$$

Donde energía liberada por la expansión del vapor en kJ

$P$  = presión existente en el recipiente justo antes de la explosión (bar)

$V$  = volumen inicial del vapor en  $m^3$

$P_a$  = presión atmosférica (bar)

$\gamma$  = relación  $C_p/C_v$  para el vapor, donde

$C_p$  = calor específico presión constante

$C_v$  = calor específico a volumen constante

Posteriormente se calculó para esta energía la masa equivalente de TNT lo que permite utilizar las ecuaciones y nomogramas de distancia normalizada ( $dn$ ) y sobrepresión dadas por Van den Berg y Lannoy<sup>25</sup>, según se describe en Casals et al<sup>22</sup> y por Bubbico y Mazzarotta<sup>37</sup>; o bien la ecuación empírica propuesta por Kinney y Graham citada por otros autores<sup>20, 37</sup>. Para el presente estudio, y con el fin de eliminar el sesgo y dificultad de lectura de nomogramas se escogió el último enfoque. La masa  $W_{(TNT)}$  de TNT equivalente (kg), según Casal et al<sup>22</sup>, se calculó con la ecuación (2), donde el factor 0,021 representa el ajuste a la ecuación (1), considerando que el factor de conversión energético adecuado es de 1120 cal/gramo de TNT:

$$W(TNT) = 0,021 * \left[ \frac{P * V}{\gamma - 1} \right] * \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right] \quad (2)$$

Según describen Casal et al<sup>22</sup>, si el recipiente contiene además líquido sobrecalentado, como es el caso de una explosión isoentrópica, debe considerarse que la masa de líquido se vaporizará súbitamente al encontrarse a presión atmosférica y se debe calcular el volumen que ocuparía el vapor a la presión existente en el recipiente un instante antes de la explosión; añadiendo este volumen virtual al volumen de vapor real. Así la masa de TNT equivalente será:

$$W(TNT) = 0,021 \left[ \frac{P * V'}{\gamma - 1} \right] \left[ 1 - (P_a/P)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad (3)$$

$$V' = V + V_l f \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \quad (4)$$

Siendo  $\left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)$  la razón densidad del líquido/densidad del vapor y  $f$ , la fracción que se vaporiza (fracción flash), la que se calcula por la siguiente fórmula:

$$f = 1 - e^{\left[ -2,63 \frac{C_p}{H_v} (T_c - T_b) \right] * \left[ 1 - \left( \frac{T_c - T_o}{T_c - T_b} \right)^{0,38} \right]} \quad (5)$$

Donde:

$H_v$  = Entalpía de vaporización (kJ/kg)

$C_p$  = Calor específico a presión constante (J/(kg/K))

$T_c$  = Temperatura crítica (K)

$T_b$  = Temperatura de ebullición de la sustancia a presión atmosférica (K)

$T_o$  = Temperatura a la que se encuentra la sustancia en el momento de la explosión

$e = 2,71828$

La distancia normalizada  $d_n$  está dada por la siguiente ecuación, donde  $d$  es la distancia desde el centro de la explosión a la que se estima la sobrepresión, siendo  $B$  la fracción de la energía de la que se transforma en onda de presión, la que para fines del presente estudio se estimó en 40 %, para una rotura dúctil<sup>22</sup>. En el caso de una rotura frágil este valor se ubica entre 10-20 % según lo propuesto por Ibrahim et al<sup>3</sup> y Sochet<sup>21</sup>.

$$d_n = \frac{d}{\sqrt[3]{B * W(TNT)}} \quad (6)$$

Se calculó la sobrepresión para cada distancia  $d$  (distancia real) utilizando la ecuación empírica propuesta por otros autores<sup>32,38</sup> para explosiones de BLEVES en el rango medio y para tanques a presión respectivamente, a partir de su equivalente en TNT:

$$\frac{P_s}{P_a} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{dn}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{dn}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{dn}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{dn}{1,35} \right)^2}} \quad (7)$$

Donde:

$P_a$  = presión atmosférica (bar)

$P_s$  = sobrepresión (bar)

$dn$  = distancia escalada ( $m/kg^{1/3}$ )

Posteriormente se compararon los efectos y daños reportados en diversas fuentes<sup>1,18,22</sup> a las sobrepresiones

generadas. Los daños esperados por sobrepresión se basaron en los desarrollos de las ecuaciones Probit de Finney<sup>39</sup> que si bien se desarrollaron inicialmente para riesgos por sustancias químicas, se han adaptado por diversos autores<sup>1,19,26</sup> para otros riesgos. Así, la normativa española, NTP 291 *Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit*<sup>26</sup> para explosiones, coincidente con lo presentado por Creus<sup>1</sup>, y basado en las ecuaciones derivadas empíricamente por Eisenberg desde el año 1975, se proponen para el análisis de daños por hemorragia pulmonar, ruptura de tímpanos o heridas en general.

Las ecuaciones Probit deben utilizarse con una tabla de equivalencias<sup>26</sup> siendo la ecuación de la forma:

$$Pr = a + b * \ln C \quad (8)$$

Donde:

*Pr* = "Probit" o función de probabilidad de daño sobre la población expuesta

*a* = Constante dependiente el tipo de lesión y tipo de carga de exposición

*b* = Constante dependiente del tipo de carga de exposición

*C* = Variable que representa la carga de exposición

La variable dependiente *Pr* se ha establecido como una variable aleatoria según una distribución estadística normal con un valor medio de 5 y una desviación tipo (desviación estándar) de 1, lo cual significa que para un porcentaje del 50 % corresponde un valor de *Pr* = 5, Creus<sup>1</sup> y la normativa española<sup>26</sup> coinciden en proponer las siguientes dos ecuaciones Probit para los riesgos de ruptura de tímpanos (9) y de hemorragia pulmonar (10):

$$Pr = -15,6 + 1,93 \ln Ps \quad (9)$$

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln Ps \quad (10)$$

Esta norma establece así una zona de alerta cuando se alcance una sobrepresión (*Ps*) local estática de la onda de presión de 50 mbar, y una zona de intervención cuando se alcance una sobrepresión (*Ps*) local estática de la onda de presión de 125 mbar<sup>26</sup>.

Para el caso de daños materiales a las instalaciones se tomó como base los estudios de daños a equipos realizado por diversos autores y resumido por Cozzani et al<sup>40,41</sup>.

## RESULTADOS

### 1. NORMATIVA

Además de las normas citadas anteriormente<sup>8-10</sup> se analizó la normativa específica de diversos países hispanoparlantes, entre ellos México<sup>42</sup>, Perú<sup>43</sup>, Chile<sup>44</sup>, España<sup>45</sup>, Colombia<sup>46</sup> y Costa Rica<sup>47</sup>; así como las normas estadounidenses<sup>48</sup> y de Nueva Zelanda<sup>49</sup>. Las normas más reconocidas<sup>8-10</sup> contemplan de manera genérica el distanciamiento a otros equipos y personas como un criterio de diseño, sin embargo no son prescriptivas en cuanto a distancias o metodología para su determinación. Se observó en la normativa de los países latinoamericanos que los riesgos por explosión o sobrepresión no son considerados de forma específica en los requerimientos de instalación para guiar el distanciamiento o resistencia estructural de las edificaciones que las contienen. A la fecha, la mayoría de estos instrumentos normativos se limitan a referencias genéricas a la ventilación, la resistencia al fuego de las paredes, indicaciones generales para utilización del código sísmico de cada nación y aspectos básicos de higiene y salud ocupacional que, si bien favorecen la segura operación, no se enfocan en el riesgo mayor que presentan dichos equipos, como lo es la sobrepresión generada por una potencial explosión.

La normativa mexicana solamente establece que se debe "disponer del espacio requerido" o "disponer el espacio suficiente" para la instalación de los equipos; sin especificar parámetros o distancias específicas.

La norma chilena establece distancias entre equipos y paredes, de solamente un metro. La norma costarricense, en su artículo 6, establece distancia entre calderas, distancias a paredes y distancias a linderos, sin establecer si son estos criterios de facilidad de instalación/operación y reparación; o bien aspectos de seguridad al público o la empresa en caso de explosiones; aspecto que es similar en la norma propuesta colombiana.

Esto deja ver que los equipos no son vistos como capaces de generar riesgos mayores a los usuarios y alrededores, incluso en Argentina, Brasil y Costa Rica, con trayectoria jurídica amplia en el campo y que actualmente revisan su legislación<sup>50-52</sup>.

Las normas nacionales estadounidenses y sus normas estatales igualmente son omisas al respecto, más bien enfocándose en requisitos técnicos de los equipos y su inspección. La normativa de Nueva Zelanda y la norma peruana son omisas al respecto.

Al referirnos a normativa estadounidense de la NFPA, un documento de una firma consultora<sup>53</sup> indica que la mayor parte de la normativa de esa asociación se refiere a eventos por materiales inflamables o intrínsecamente

explosivos y no considera la sobrepresión en la explosión de calderas. Una publicación de la industria del petróleo y gas<sup>5</sup> dirigida al sector de procesos químicos establece una serie de nomogramas y tablas para la separación de distintas secciones de dichas operaciones, e indica que para las secciones de "utilities" o servicios comunes (donde generalmente se ubican las calderas), estas deben estar a aproximadamente 15 metros (50 pies) de centros de control eléctrico, cuartos de motores, sistemas de protección de incendios y otros edificios de servicio, aproximadamente a 30 metros (100 pies) de equipos de riesgo medio (compresores, cuartos de control, estaciones de bombeo y otras unidades de proceso), y hasta aproximadamente 100 metros (350 pies) de tanques a presión o refrigerados.

Específicamente para tanques a presión atmosférica, característicos de la mayoría de los tanques de almacenaje de combustibles para calderas, se refiere a una distancia de aproximadamente 75 metros (250 pies) entre estos y las áreas de servicios generales ("utilities") donde se ubican las calderas. El énfasis en dicho documento es, no obstante, la protección de los activos de las empresas, y pretende evitar el encadenamiento de eventos (efecto dominó), sin brindar detalles de cómo se arribó a dichas distancias.

La normativa española<sup>45</sup> vigente establece tan solo una distancia de 5 metros a riesgos ajenos, y distancias de un metro a paredes propias. No obstante, como parte de la actualización reglamentaria en España, se están proponiendo modificaciones a la misma, con plazo para alegaciones hasta noviembre del 2019, donde en las Instrucciones Técnicas Complementarias, efectivamente se contempla un distanciamiento mayor, motivado por el contenido energético de las calderas (pirotubulares, acuotubulares y de fluido térmico)<sup>54</sup>, en prevención del riesgo de explosión, lo que marcaría un hito reglamentario. A la fecha de redacción no se localizó información alguna sobre su publicación o entrada en vigencia, última que se había propuesto para el mes de julio del 2020.

## 2. ANÁLISIS CUANTITATIVO

Se realizaron los cálculos correspondientes a las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y (7), para ocho tamaños de caldera (tabla 1), cubriendo los cuatro rangos de clasificación (A-B-C-D) según capacidad de producción (kilogramos de vapor/hora) o potencia, establecida en el Decreto 26789-S-MTSS, *Reglamento de Calderas de Costa Rica*, vigente desde abril de 1998<sup>47</sup>, vigente y en implementación por el Ministerio de Salud como autoridad competente.

Tabla 1. Potencia y generación de vapor típicas para calderas según su clasificación en la reglamentación costarricense (Decreto N° 26 789)

Caso	Potencia de Caldera (HP)	Generación de vapor (kg/hr)	Clase según Reglamentación Nacional
1*	4	62	D
2	50	780	C
3	125	1950	C
4	200	3120	B
5	300	4680	B
6	400	6240	B
7	600	9360	A
8	800	12480	A

Fuente: *Elaboración propia*

\*Este caso corresponde a promedios de otros fabricantes, ya que el fabricante líder no trabaja en el rango bajo de la escala.

Para el dimensionamiento en relación con la masa de vapor y agua contenida en la caldera se utilizaron datos de equipos de un reconocido fabricante y líder en diseño a nivel internacional (Cleaver-Brooks, Modelo CB), considerando que otras calderas de marcas distintas emulan al líder en dichas dimensiones y condiciones de

operación. Según datos de diseño las calderas tienen un espacio de vapor de aproximadamente el 10 % del volumen líquido, por lo que se tomó dicho valor para los cálculos (tabla 1). Así, se analizaron los 8 casos, asumiendo que todas las calderas, si bien varían en su potencia (4-800 HP) o tasa de generación de vapor, operan a una

presión similar o menor a 150 psi (10,2 bar), congruente con más del 50 % del rango de dicho fabricante (15-250 psi), pero siendo 150 psi la presión máxima usual para los requerimientos del mercado nacional y latinoamericano, en la que la mayoría de los equipos son para generación de vapor de procesos industriales, comerciales y para

agua caliente. En el caso de Costa Rica, el 90 % de las calderas registradas en el Ministerio de Salud tienen una presión de diseño (presión máxima de operación) por debajo de 150 psi. Para fines del presente estudio, la ruptura se asume que ocurre a dicha presión en todos los casos y se calculó la masa equivalente de TNT, lo que se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Equivalente en masa de TNT (kg) según el volumen de agua

Caso (Clase de Caldera)	Potencia de Caldera (HP)	Volumen líquido normal (m <sup>3</sup> )	Volumen vapor (m <sup>3</sup> )	Masa TNT <sub>eq</sub> (kg)
1 (D)*	4	0,06	0,006	0,32
2 (C)	50	1,42	0,178	7,50
3 (C)	125	2,61	0,261	13,8
4 (B)	200	3,85	0,385	20,3
5 (B)	300	5,80	0,580	30,6
6 (B)	400	6,97	0,697	36,8
7 (A)	600	10,46	0,105	55,3
8 (A)	800	12,41	0,124	65,5

Fuente: Elaboración propia

\*Este caso corresponde a promedios de otros fabricantes, ya que el fabricante líder no trabaja en el rango bajo de la escala.

En la figura 1 se muestra la sobrepresión ( $P_s$ ) en función de la distancia para dicha explosión, para los distintos niveles de potencia de las calderas (4-800 HP). La tabla 3 muestra los daños esperados según la sobrepresión, tomada de Lees<sup>18</sup> y se marcan en color los umbrales escogidos por Fang<sup>4</sup> como niveles de análisis. En la tabla 4, se muestra la sobrepresión generada para

cada uno de los casos y distancias, y se han marcado en recuadro/color los valores cercanos al nivel mínimo de presión (0,03 bar) utilizado por Fang<sup>4</sup>, lo que ese autor denomina como "distancia segura" (probabilidad de 0,95 de que no haya daño serio más allá de ese valor); límite para proyectiles, algún daño a techos de casa, 10 % de vidrios de ventanas rotos, según cálculos Probit.

Figura 1. Sobrepresión-distancia para explosiones de calderas

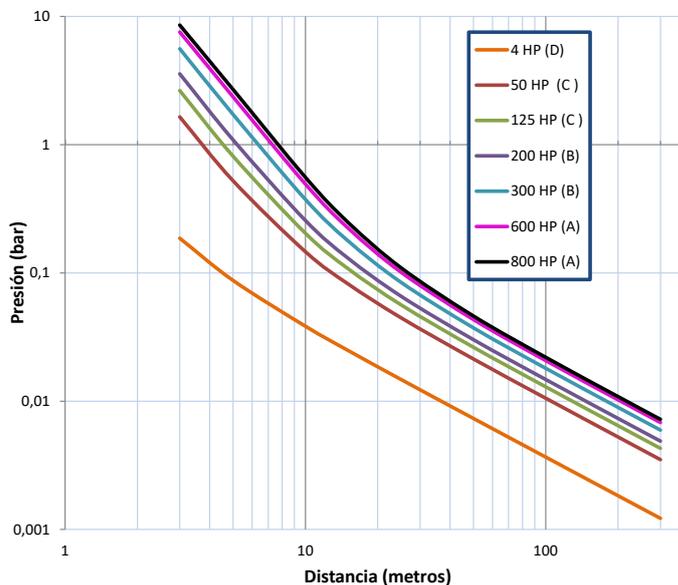


Tabla 3. Daños esperados según sobrepresión (bar)

Daños esperados	Sobrepresión (bar)
Ruido fuerte (143 db), "boom sónico", ruptura de vidrios	0,0028
Presión típica para ruptura de vidrios	0,0103
<b>Daño estructural menor y limitado</b>	<b>0,0300</b>
Ventanas generalmente rotas, algún daño a marcos de ventanas	0,0345-0,0690
Daño menor a estructuras domésticas	0,0483
Demolición parcial de casas; tornándolas inhabitables	0,0690
Paneles metálicos corrugados fallan y se tuercen, Paneles de madera en casas son derribados	0,0690-0,1379
Rango para heridas por laceración, de leves a serias, por vidrio volante y otros proyectiles	0,0690-0,5517
<b>Colapso parcial de paredes y techos de casas</b>	<b>0,1379</b>
Concreto no reforzado o paredes de ladrillo se rompen	0,1379-0,2069
Rango para probabilidad del 1 al 90 % de ruptura de tímpanos en poblaciones expuestas	0,1655-0,8414
50 % destrucción de paredes de ladrillo en casas	0,1724
Marcos de acero en edificios sufren distorsión y son separados de su fundación	0,2069
Postes de madera rotos,	0,3448
Casi completa destrucción de casas	0,3448-0,4828
Vuelco de vagones de tren cargados	0,4828
Demolición de vagones de carga en trenes	0,6207
Probable destrucción total de edificios	0,6897
1-99 % de fatalidades (muertes) en poblaciones expuestas por efectos directos de la explosión	1,0-2,0

Fuente: Adaptado de Lees, Frank P, 1980. *Loss Prevention in the Process Industries, Vol, 1, London and Boston: Butterworths y Fang et al, 2012.*

Tabla 4. Sobrepresión (bar) por explosión de calderas 4-800 HP

Distancia (m)	4 HP (D)	50 HP (C)	125 HP (C)	200 HP (B)	300 HP (B)	400 HP (B)	600 HP (A)	800 HP (A)
3	0,1864	1,6467	2,6417	3,5665	4,8742	5,5967	7,5577	8,5575
5	0,0873	0,5228	0,8129	1,0896	1,4927	1,7210	2,3590	2,6937
10	0,0384	0,1463	0,2037	0,2562	0,3313	0,3737	0,4927	0,5557
15	<b>0,0249</b>	0,0823	0,1083	0,1308	0,1616	0,1785	0,2249	0,2490
25	<b>0,0148</b>	0,0447	0,0563	0,0658	0,0780	0,0844	0,1012	0,1096
50	0,0073	<b>0,0213</b>	<b>0,0263</b>	<b>0,0302</b>	<b>0,0349</b>	<b>0,0373</b>	0,0433	0,0461
100	0,0037	<b>0,0105</b>	<b>0,0129</b>	<b>0,0147</b>	<b>0,0169</b>	<b>0,0180</b>	<b>0,0207</b>	<b>0,0220</b>
200	0,0018	0,0053	0,0064	0,0073	0,0084	0,0089	<b>0,0102</b>	<b>0,0108</b>
300	0,0012	0,0035	0,0043	0,0049	0,0056	0,0060	0,0068	0,0072

Fuente: *Elaboración propia*

A fin de comparar los resultados de las simulaciones, se utilizó este valor de sobrepresión, se calculó el Probit y % de daño por ruptura de tímpanos, de conformidad con la ecuación (9); y se tabuló la distancia a la que ocurre dicha sobrepresión para cada tipo de caldera, lo que se detalla en la tabla 5. Se utilizó la ruptura de

tímpanos ya que este riesgo es más conservador en sus cálculos que la ecuación (10) para % de muertes por hemorragia pulmonar. Se incluyen en la tabla 5 las distancias calculadas que resultarían de aplicarse los niveles de alerta (50 mbar) e intervención (125 mbar) de la normativa española NTP 291.

Tabla 5. Valores Probit, % de ruptura de tímpanos y distancias recomendadas según potencia de calderas

Nivel	Sobrepresión (bar)	Probit	%	POTENCIA DE CALDERA (HP)		
				125 (C)	300 (B)	600 (A)
				Distancia (m)	Distancia (m)	Distancia (m)
ALERTA	0,03 (Fang)	-0,15	0	25	50	75
	0,050(NTP 291)	0,83	0	20	40	50
INTERVENCIÓN	0,125(NTP 291)	2,61	1	15	20	25
	0,140 (Fang)	2,83	1,5	12	15	20
	0,200 (Fang)	3,51	7,0	10	13	15

Fuente: Elaboración propia

Clasificación A-B-C, según Decreto 26789-MTSS, Costa Rica

NOMENCLATURA	
<i>a</i>	Constante dependiente el tipo de lesión y tipo de carga de exposición
<i>b</i>	Constante dependiente del tipo de carga de exposición
<i>B</i>	Fracción de la energía que se transforma en onda de presión
<i>C</i>	Variable que representa la carga de exposición
<i>C<sub>p</sub></i>	Calor específico a presión constante (J/(kg/K))
<i>C<sub>v</sub></i>	Calor específico a volumen constante (J/(kg/K))
<i>dn</i>	Distancia escalada (m/kg <sup>1/3</sup> )
<i>Ev</i>	Energía liberada por la expansión del vapor (kJ)
<i>f</i>	Fracción del líquido que se vaporiza (flasheo)
<i>γ</i>	Relación Cp/Cv para el vapor
<i>Hv</i>	Entalpía de vaporización (kJ/kg)
<i>P</i>	Presión existente en el recipiente justo antes de la explosión (bar)
<i>Pa</i>	Presión atmosférica (bar)
<i>Pr</i>	"Probit" o función de probabilidad de daño sobre la población expuesta
<i>Ps</i>	Sobrepresión (bar); (N/m <sup>2</sup> , ecuación Probit)
<i>pl</i>	Densidad del líquido (kg/m <sup>3</sup> )
<i>pv</i>	Densidad del vapor (kg/m <sup>3</sup> )
<i>Tb</i>	Temperatura de ebullición de la sustancia a presión atmosférica (K)
<i>Tc</i>	Temperatura crítica (K)
<i>To</i>	Temperatura en el momento de la explosión (K)
<i>V</i>	Volumen inicial del vapor (m <sup>3</sup> )
<i>V'</i>	Volumen equivalente de vapor en la caldera al momento de la explosión
<i>V<sub>l</sub></i>	Volumen del líquido en la caldera al momento de la explosión
<i>W(TNT)</i>	Masa equivalente de TNT (kg)

## DISCUSIÓN

Los resultados presentados para todos los tamaños de calderas son congruentes con establecer distancias mayores a 1-6 metros, que son las distancias usuales expresadas en la legislación internacional como separación a paredes, otros equipos y riesgos ajenos. Para calderas pequeñas (4-50 HP), los resultados indican que sería aconsejable distanciar estas entre 15-25 metros de sitios usualmente ocupados por trabajadores u otras habitaciones. En el caso de calderas mayores (125-800 HP) las distancias recomendadas a otras ocupaciones laborales deberían ser de 25-50 metros, según disponibilidad de terreno y tipo de construcción. Se observa en la figura 1 que a partir de los 50 metros no hay ganancias marginales importantes en la protección de los activos de la empresa.

Ibrahim et al<sup>3</sup>, utilizando modelos computacionales con LS-DYNA, concluyen que aumentar la distancia del cuarto de calderas, a partir de 2 metros y hasta 6 metros de otros edificios, produce una reducción significativa (47 % de reducción) en la sobrepresión sobre la fachada afectada, así como una reducción de la velocidad de la explosión en un 76 %, lo que representa un criterio de diseño de interés para proyectistas. Indica además que 6 metros es la distancia usualmente a cumplir en la normativa egipcia entre el cuarto de calderas y el edificio de planta más cercano.

Es importante notar que en los casos analizados y marcados en la envolvente de la tabla 4 se está en el rango inferior de los daños reportados por Cozzani y Salzano<sup>40,41</sup> para daños a equipos de procesos, generándose, por ejemplo, daños menores a torres de enfriamiento, a tanques con techo cónico (50-100 % llenos), y daños estructurales inferiores al 1 % en equipos adyacentes.

Por fortuna, el límite inferior del rango de valores para ruptura de tímpanos (0,17 bar) es aproximadamente cuatro veces superior al rango en el que se observan daños menores a edificios. Este valor podría ser indicativo de la dimensión más corta que debe tener un cuarto o recinto de calderas, con el fin de minimizar la exposición de personal no calderero, lo que para los casos analizados no debe ser inferior a 15 metros de longitud.

En el caso del personal expuesto por trabajo permanente o frecuente en el cuarto de calderas, en una distancia inferior a los 5 metros de la caldera, podría generarse daño grave o mortal, siendo en este radio la sobrepresión superior a 1 bar, por lo que la permanencia del operador para otras funciones

en este radio (ej. operación de equipo de tratamiento de aguas, análisis de agua de caldera, toma de datos, vigilancia de equipos, etc.) debe evitarse o minimizarse.

El presente estudio se limitó a calcular la sobrepresión generada por un estallido vapor/agua como BLEVE, aplicable a calderas que en su mayoría son de geometría cilíndrica, y no contempla el cálculo de la energía incorporada en la proyección de fragmentos, y los efectos probabilísticos de los mismos. Esta es una simplificación en relación al uso de curvas características (Presión-Impulso) propuestas por González-Ferradas et al<sup>26, 55</sup>, y que han sido aplicadas a explosiones en recipientes esféricos y cilíndricos. En esta línea, es aleccionador el accidente reportado en Tennessee<sup>17</sup>, que muestra la proyección de fragmentos y desplazamiento de equipos cilíndricos, ambos que pueden rondar los 30 metros. En el caso de tanques cilíndricos<sup>22</sup> se reporta que podrían generarse entre 3-20 fragmentos; sin embargo, el 70 % de estos alcanzan distancias inferiores a los 200 metros; pero alcanzándose en algunos casos distancias de hasta 600-700 metros.

Es importante anotar que toda modificación constructiva que limite el posible efecto rebote de la presión contra las paredes contribuiría a disminuir la sobrepresión hacia los sitios o personas expuestas, como por ejemplo la construcción de techos livianos, paredes livianas, o paredes con aberturas de ventilación, como demostraron Ibrahim et al<sup>3</sup>.

El autor coincide con el criterio de Sochet<sup>21</sup>, que los modelos utilizados en el presente estudio presentan una opción sencilla y económica, con relación a los modelos computacionales de dinámica de fluidos o modelos numéricos para simulación de edificios, pues estos últimos requieren mayores capacidades de equipo de computación y tiempo-máquina. Modelos como estos últimos igualmente requieren datos estadísticos sobre condiciones meteorológicas para la simulación, los que no siempre están disponibles en todas las instalaciones industriales.

Deben tomarse las distancias de seguridad sugeridas en la tabla 5, como mínimos a cumplir en las instalaciones industriales, pues existe discrepancia entre los autores<sup>3,21, 22</sup> en cuanto a la proporción de la energía de la expansión que se transforma en onda de presión efectiva y dirigida hacia equipo y personal expuesto. Asimismo, este análisis se complica al considerarse el efecto del suelo, paredes, aberturas/ventanas y equipos adyacentes; área que amerita estudiarse mejor a futuro, y para lo que aún los modelos numéricos más avanzados presentan limitaciones. Sin embargo, esta discrepancia entre autores en la proporción efectiva de energía que se incorpora a la onda de presión genera alguna incertidumbre en la sobrepresión estimada y los daños, pero estos se

mantienen dentro del mismo orden de magnitud, pues la curva distancia escalada – sobrepresión, propuesta por Van den Berg y Lannoy<sup>1,25</sup>, es logarítmica en ambos ejes.

Las normativas de asociaciones profesionales, así como las regulaciones de los países latinoamericanos y de otras latitudes son, en general, omisas en fijar requisitos estrictos o claros para el distanciamiento y ubicación entre cuartos o recintos de caldera y otras ocupaciones con base en el análisis de consecuencias, si bien fijan requisitos para las características mecánicas de los equipos y las normas de operación e inspección. Con el modelo y procedimiento propuesto en la presente investigación es posible estimar “*distancias seguras*” mínimas entre la caldera y otras estructuras y equipos de planta, que también protegen a los seres humanos de la sobrepresión de la onda expansiva en caso de fallo catastrófico, lo que sin duda es útil a los proyectistas. El presente estudio muestra la utilidad de los modelos simples de sobrepresión-distancia, en combinación con los modelos Probit, en relación con modelos más complejos de dinámica de fluidos y cálculos estructurales de elementos finitos. Se propone a los reguladores, diseñadores y usuarios industriales, que el análisis de las consecuencias y daños, utilizando modelos similares al aquí presentado para explosión de calderas, u otros más complejos, se incorporen en la legislación de los distintos países y se utilice para guiar la selección de sitio y la distribución de la planta. Esta acción de prevención redundará en un menor número de accidentes con lesiones y contribuirá a reducir las pérdidas económicas por daños materiales y responsabilidades laborales y civiles, ya que un accidente o explosión en calderas puede generar daños a trabajadores como a poblaciones o industrias vecinas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Creus A. Fiabilidad y Seguridad: Su aplicación en procesos industriales. Marcombo. Barcelona, 1992.
- Shrivastava R, Patel P. Hazards Identification and Risk Assessment in Thermal Power Plant. *Int J Eng Res Technol* 2014; 3(4):1737.
- Ibrahim MF, El-Arabaty HA, Moharran I. Effect of steam boiler explosion on boiler room and adjacent buildings structure. *Int J Eng Sci* 2019; Vol, 8, No, 02, Series II: 17-37.
- Fang Q, Zhe Z, Qingmin S. Application of Phast in the Quantitative Consequence Analysis for the Boiler BLEVE, En: ISDEA'13: Proceedings of the 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications; 2013, pp, 369-372 <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2012.92>.
- Global Asset Protection Services LLC, Oil and Chemical Plant Layout and Spacing. GAPS Guidelines. GAP 2,5,2, 2015.
- Cozzani V, Salzano B. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part I, Probit models. *J. Hazard. Mater* 2004; A 107, 67-80.
- González-Ferradás E, Díaz-Alonso F, Sánchez-Pérez JF, Doval Miñarro M, Miñana-Aznar A, Ruiz-Gimeno J, Martínez-Alonso J. Consequence Analysis to Buildings from Bursting Cylindrical Vessels, *Process Safety Progress*, 2009; Vol, 28(2): 179-189.
- National Board Inspection Code 2019 (ANSI, NB-23), EEUU.
- National Fire Protection Association (NFPA) A 85. Boiler and Combustion Systems Hazards Code, 2015 Edition, Massachusetts, EEUU.
- Directiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de mayo de 2014, relativa a la armonización de las legislaciones de los Estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión. DOUE, número L 184/164 de 27 de junio de 2014.
- Scientific American. Cause of Boiler Explosions. *Scientific American* 3, 25new, 386 (December 1860) doi:10.1038/scientificamerican12151860-386. [citado 12/05/2020]. Disponible en: <https://www.scientificamerican.com/article/cause-of-boiler-explosions/>.
- National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, 2002. Incident Report, *Bulletin*, 2003; 58(2): 2-3.
- National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, 2002. Boiler accidents report: To err is human. *Bulletin*, 2002; Vol, 57(2). [citado 12/05/2020]. Disponible en: <https://www.achnews.com/articles/87615-boiler-accident-reports-to-err-is-human>.
- Oelker-Behn A. Accidentes en Calderas, THERMAL ENGINEERING LTDA, (sin fecha). [citado 12/05/2020]. Disponible en: [http://www.thermal.cl/docs/articulos\\_tecnicos/articulo\\_\\_\\_accidentes\\_en\\_calderas.pdf](http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/articulo___accidentes_en_calderas.pdf).
- Editorial. Combustión, Energía y Ambiente. Relación de accidentes en el primer semestre. Calderas. Guía del Usuario en la Industria y el Comercio. CEACA, 2020 1(1), 6-8.
- American Society of Power Engineers. Your Boiler Room a Time Bomb? [citado 12/05/2020]. Disponible en: [https://asope.org/sites/default/files/Documents/Your\\_Boiler\\_Room-A%20\\_Time\\_Bomb-2.pdf](https://asope.org/sites/default/files/Documents/Your_Boiler_Room-A%20_Time_Bomb-2.pdf).
- Estado de Tennessee (EEUU), 2007. Department of Labor and Workforce Development, Division Of Boiler And Elevator Inspection, Boiler Accident Dana Corporation, Paris Extrusion Plant. [citado 12/05/2020]. Disponible en: <http://www.ipemaritimes.com/bxpl.pdf>.
- Lees FP, Loss Prevention in the Process Industries. Butterworths, Vol, 1. London and Boston, 1980.
- Casal J, Arnaldos J, Montiel H, Planas-Cuchi E, Vilchez JA. Modeling and Understanding BLEVEs (Capítulo 22). En *Handbook of Hazardous Materials Spills Technology*: 22,1-22,27. [citado 12/05/2020]. Disponible en: <http://aevnmont.free.fr/SACH-BOOKS/Petrochemistry/Handbook%20of%20Hazardous%20Materials%20Spills%20Technology/Part%20V,%20Spill%20Modeling/22,%20Modeling%20and%20Understanding%20BLEVEs.pdf>.
- Birk AM, Davison C, Cunningham M. Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. *J Loss Prev Process Ind* 2007; 20: 194-206.
- Sochet I, Blast effects of external explosions. En: *Eighth International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*, Yokohama, Japón: Sep, 2010. [citado 12/05/2020]. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00629253/document>.

22. Casal J, Montiel H, Planas-Cuchi E, Vílchez JA. "BLEVE-bola de fuego" (Capítulo 6), En: *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Editorial Alfaomega; Bogotá, 2001, pp, 173-205.
23. The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO). *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (gases and liquids)*. "The Yellow Book" CPR 14E, 3ra, Ed, La Haya, Reino de los Países Bajos, 2005.
24. Díaz-Alonso F, González-Ferradás E, Sánchez-Pérez JF, Miñana-Aznar A, Ruiz-Gimeno J, Martínez-Alonso J. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substances. *J Loss Prev Process Ind* 2006; 19, 724-728.
25. Van de Berg AC, Lannoy A. 1993. *Methods for Vapor Cloud Explosion Blast Modelling*. *J. Hazard Mater* 1993; 34, 151-171.
26. González-Ferradás E, Díaz-Alonso F, Sánchez-Pérez JF, Miñana-Aznar A, Ruiz-Gimeno J, Martínez-Alonso J. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for Vessel Burst. *Process. Saf. Prog (AIChE)* 2006; Vol, 25(3): 250-254.
27. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España). NTP 291: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit. [citado 12/05/2020]. Disponible en: [https://www.cso.go.cr/legislacion/notas\\_tecnicas\\_preventivas\\_insht/NTP%20291%20-%20Modelos%20de%20vulnerabilidad%20de%20las%20personas%20por%20accidentes%20mayores%20metodo%20Probit.pdf](https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20291%20-%20Modelos%20de%20vulnerabilidad%20de%20las%20personas%20por%20accidentes%20mayores%20metodo%20Probit.pdf).
28. Zaghoul A, Ranaweera P, Mohotti D. *Assessment of Blast Effects on Passengers in Underground Trains*, En: *25<sup>th</sup> Australian Conference on Mechanics of Structures and Materials (ACMSM25) Brisbane, Australia*; 2018.
29. The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO). *Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials "The Green Book"* CPR 16E, 1ra, Ed, La Haya, Reino de los Países Bajos, 1992.
30. Díaz-Ovalle C, López-Molina A, Vázquez-Román R. A CFD-based Approach to Predict Explosion Overpressure: A Comparison to Current Methods, *Chem, Biochem, Eng, Q*, 2016; 30(4): 419-427.
31. Kakogiannis D, Van Hemlrijck D, Wastiels J, Palanivelu S, Van Paepegem W, Vantomme J, Kotzakolios T, Kostopoulos V. *Assessment of pressure waves generated by explosive loading*, (preprint). *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2010; 65(1): 1-15. [citado 12/05/2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/228813743\\_Assessment\\_of\\_Pressure\\_Waves\\_Generated\\_by\\_Explosive>Loading](https://www.researchgate.net/publication/228813743_Assessment_of_Pressure_Waves_Generated_by_Explosive>Loading).
32. Jeon D, Kim K, Han S. Modified Equation of Shock Wave Parameters, *Computation*, 2017; 5(3): 1-14. [citado 12/05/2020]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-3197/5/3/41>.
33. Dadashzadeh H, Khan F, Hawboldt K, Amyotte P. An integrated approach for fire and explosion consequence modelling. *Fire Saf J* 2013; 61: 324-337.
34. Cozzani V, Tugnoli A, Salzano E. Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design. *J Hazard Mater* 2007; A139: 209-219.
35. Khan F, Abbasi SA, *Models for Domino Effect Analysis in Chemical Process Industries*, *Process. Saf. Prog* 1998; 17(2): 107-123.
36. López, Molina A, Vázquez-Román R, Sam Mannan M, Félix-Flores MG. An approach for domino effect reduction based on optimal layouts. *J Loss Prev Process Ind* 2013; 26: 887-894
37. Bubbico R, Mazzarotta B. Analysis and comparison of calculation methods for physical explosions of compressed gases. *AIDIC Conference Series*, 2013; 11: 81-90 DOI: 10.3303/ACOS1311009.
38. Zareei H, Khosravi-Nikou M, Shariati A. (2016). A Consequence Analysis of the Explosion of Spherical Tanks Containing Liquefied Petroleum Gas (LPG). *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, 2016; 5(3): 32-44 .
39. Finney, D.L. *Probit Analysis*. Cambridge University Press. Londres, 1971.
40. Cozzani V, Salzano B. Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment. *J Loss Prev Process Ind* 2004; 17, 437-447.
41. Cozzani V, Gubinelli G, Salzano B (2006). Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *J Hazard Mater* 2006; A129: 1-21.
42. Norma Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2011. Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas - Funcionamiento - Condiciones de Seguridad, de 16 de diciembre del 2011. *Diario Oficial de 27 de diciembre del 2011*.
43. Norma Técnica Peruana 350,301 del 4 de febrero del 2009. *Calderas industriales, Estándares de eficiencia térmica (combustible/vapor) y etiquetado*, 2ª Edición.
44. Decreto No, 10. *Reglamento de Calderas y Generadores de Vapor*, del 2 de marzo del 2012, publicado el 19 de octubre del 2013. [citado 12/05/2020] Disponible en: [http://www.supersalud.gob.cl/observatorio/671/articles-8910\\_recurso\\_1.pdf](http://www.supersalud.gob.cl/observatorio/671/articles-8910_recurso_1.pdf).
45. Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre del 2008, *Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias*. B.O.E, número 31, del 5 de febrero del 2009.
46. *Reglamento Técnico de Calderas (Proyecto) Colombia*. [citado 29/12/2019]. Disponible en: <http://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59676/PROYECTO+DE+RESOLUCION+POR+LA+CUAL+SE+EXPIDE+EL+REGLAMENTO+TECNICO+DE+CALD ERAS.pdf/1a7449ce-9575-7c61-2173-499a99f3ad4a>.
47. Decreto 26789-MTSS del 16 de febrero del 1998, *Reglamento de Calderas*. *La Gaceta No*, 65 del 2 de abril del 1998.
48. *National Board Synopsis of Boiler and Pressure Vessels Laws Rules and Regulations*, 2010.
49. *Health and Safety in Employment Act 1992* de marzo del 1996. Approved code of practice for the design, safe operation, maintenance and servicing of boilers; (rev, 2004, enmienda 2004). *Occupational Safety and Health Service Department of Labour*, Wellington, NZ.
50. Domínguez A, Schneebeli J. *Argentina: Reglamentos de seguridad, Calderas y Recipientes a Presión, Calderas – Guía del Usuario en la Industria y el Comercio*. 2020; Vol, 1(1), 12-14, Editorial CEACA.
51. Cardozo J, *Regulamentação no Brasil. Calderas – Guía del Usuario en la Industria y el Comercio*, 2020; Vol, 1(1), 15-17, Editorial CEACA.

52. Solano P, Fernández A. Reglamentación en Costa Rica sobre calderas, Calderas – Guía del Usuario en la Industria y el Comercio, 2020; Vol, 1(1), 18-21. Editorial CEACA.
53. Argo T, Sandstrom E, Separation Distances in NFPA Codes and Standards, The Fire Protection Research Foundation 2014. [citado 12/05/2020]. Disponible en: <https://www.nfpa.org/assets/files/aboutthecodes/59a/rfseparationdistancesnfpacodesandstandards.pdf>.
54. Real Decreto por el que se por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias (BORRADOR 14 DE OCTUBRE 2019), Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. [citado 12/05/2020]. Disponible en: [https://industria.gob.es/es-es/participacion\\_publica/Paginas/Proyecto-Real-Decreto-Reglamento-Equipos-a-presion.aspx](https://industria.gob.es/es-es/participacion_publica/Paginas/Proyecto-Real-Decreto-Reglamento-Equipos-a-presion.aspx).
55. González Ferradás E, Díaz Alonso F, Sanchez Perez J,F, Miñana Aznar A, Ruiz Gimeno J, Martinez Alonso, J.. Consequence analysis by means of characteristic curves to determine the damage to buildings from bursting spherical vessels. Process Saf Environ Prot 2008; 86: 175–181.