

**SOCIETAT CATALANA
DE TECNOLOGIA**

L'ACCIDENT BLEVE - BOLA DE FOC,

A CÀRREC DE

JOAQUIM CASAL I FÀBREGA,

DEL CENTRE D'ESTUDIS

DEL RISC TECNOLÒGIC

DE LA UNIVERSITAT

POLITÈCNICA DE CATALUNYA

La BLEVE (*boiling liquid expanding vapor explosion*) és un dels accidents més severos que poden ocórrer a la indústria de procés, en l'emmagatzematge d'hidrocarburs i en el transport de determinats productes perillosos. De BLEVE n'hi ha de tant en tant i, malauradament, és molt difícil que deixin d'haver-n'hi.

En la conferència es presentaran les principals característiques d'aquest accident, així com la seva freqüència i les substàncies més usuals en les quals té lloc.

S'exposaran també les metodologies emprades per estimar-ne els efectes (radiació tèrmica, ona de sobrepressió i fragments) i les seves conseqüències (models de vulnerabilitat), així com les mesures preventives més adients. Finalment es discutiran alguns dels accidents ocorreguts.

1. INTRODUCCIÓ

Les explosions BLEVE són accidents que, per les seves característiques i, sovint, per les circumstàncies en què ocorren, solen presentar una gran severitat. Tot i que, estrictament parlant, la BLEVE és una explosió mecànica —pot succeir, per exemple, en una caldera de vapor d'aigua— que no ha d'incloure per força efectes tèrmics, sovint el líquid involucrat és un combustible que origina una bola de foc immediatament després de l'explosió. És per això que normalment es parla de la combinació BLEVE - bola de foc, és a dir, un accident que comprèn alhora els efectes d'una explosió i d'un incendi.

Aquest tipus d'accident succeeix amb una certa freqüència, atès que les substàncies que el poden produir (propà, butà, clorur de vinil, clor, etc.) són relativament corrents a la indústria i, d'altra banda, es troben tant en instal·lacions fixes com en el transport per carretera o per tren.

La taula adjunta mostra les causes més freqüents de BLEVE (Prugh, 1991). Tot i que en algun cas poden coincidir més d'una d'aquestes causes, és evident que els incendis, els descarrilaments i el sobrecompliment són les causes més freqüents d'aquests accidents.

TAULA 1. *Causas més freqüents de BLEVE*

<i>Causa</i>	<i>%</i>
Incendi	26
Descarrilament	20
Sobrecompliment	18
Reacció fora de control	12
Col·lisió	10
Sobrepresió	6
Altres	8

En aquest text es comenten les principals característiques d'aquest tipus d'accident, així com la metodologia per estimar-ne els efectes.

2. QUÈ SÓN LES EXPLOSIONS BLEVE?

Si un recipient que conté un líquid a pressió és escalfat —per exemple, per un incendi—, la pressió al seu interior anirà augmentant. Arribarà un moment que la paret del dipòsit no la podrà resistir i aquest esclatarà. Això és més probable que passi a la part superior del dipòsit, on la paret no està en contacte amb el líquid i, per tant, no està refrigerada; en augmentar la temperatura, disminueix la resistència mecànica. En canvi, la part del dipòsit que es troba en contacte amb el líquid serà refrigerada per aquest, amb la qual cosa mantindrà una temperatura molt més baixa.

Quan el recipient esclata, la despressurització instantània fa que el líquid passi a tenir momentàniament un

altíssim grau de sobreescalfament, cosa que provoca una vaporització brutal. Si la temperatura del líquid en el moment de la despressurització és superior a un valor determinat per a cada substància, denominat *temperatura límit de sobreescalfament*, tindrà lloc la vaporització violenta i instantània d'una part del líquid; aleshores l'increment sobtat de volum —1.750 vegades en el cas de l'aigua i 250 en el cas del propà— originarà una violenta explosió. L'ona de sobrepressió generada pot ser extraordinàriament destructiva i els fragments del dipòsit poden ser projectats fins a grans distàncies.

Si la substància involucrada no és combustible, la sobrepressió i la projecció de fragments seran els únics efectes de l'explosió. Ara bé, si es tracta d'un combustible (per exemple, gas de petroli líquat), llavors la massa alliberada en

388



FIGURA 1. Bola de foc en una planta de procés. La xemeneia de la dreta té una altura de 180 m.

l'explosió —una barreja de vapor i petites gotes de líquid— s'inflamarà i es formarà un núvol de foc de forma aproximadament hemisfèrica, inicialment arran de terra. El combustible només pot cremar per la perifèria d'aquest núvol, ja que a l'interior es troba fora dels límits d'inflamabilitat. Posteriorment, la turbulència del foc fa entrar aire dins la bola de foc. Al mateix temps, la radiació tèrmica evapora les gotetes de líquid i escalfa la barreja; per consegüent, tot el conjunt augmenta de volum i evoluciona cap a una forma aproximadament esfèrica que ascendeix deixant al darrere un solc de diàmetre variable. La radiació despresa per aquestes boles de foc, molt lluminoses, sol ser d'una gran intensitat. L'acció combinada de l'explosió i la bola de foc, doncs, produeix els efectes següents:

- radiació tèrmica
- ona de sobrepressió
- ejecció de fragments.

És interessant observar que és pràcticament impossible establir el moment exacte en el qual tindrà lloc l'explosió. Fa vint anys es pensava que, una vegada iniciada l'emergència —per exemple, perquè el foc havia començat a afectar un dipòsit— es disposava encara d'un cert temps abans de l'explosió per a emprendre determinades mesures (per exemple, els bombers refrigerar amb mànegues el dipòsit). A mesura que es va disposar de més informació, però, es va veure que aquest temps podia ser extraordinàriament curt, com en el cas de l'accident de San Juan Ixhuatepec (Ciutat de Mèxic, 1984), en el qual entre l'aparició de les primeres flames i la primera BLEVE van transcórrer només 69 segons.

L'instant en el qual pot ocórrer una BLEVE en un dipòsit sotmès a l'acció del foc depèn dels factors següents:

— el flux tèrmic des del foc, que estarà en funció de la distància i de la grandària de les flames i, sobretot, de si hi ha o no contacte directe entre les flames i el dipòsit

- el nivell de líquid en el dipòsit
- la capacitat de descàrrega de les vàlvules de seguretat
- l'existència d'una capa d'aïllament, dispositius de refrigeració, etc.

Encara que han estat suggerits diferents criteris, atesa la incertesa sobre quan pot ocórrer la BLEVE una vegada iniciada l'emergència, la pràctica més aconsellable és acceptar que l'explosió pot produir-se en qualsevol moment des del començament de l'acció del foc sobre el dipòsit i, per tant, evacuar ràpidament l'àrea afectada.

3. CONDICIONS PER A L'OCURRÈNCIA D'UNA BLEVE

Tot i que l'explosió d'un tanc que conté un líquid inflamable pressuritzat anirà seguida quasi sempre d'una bola de foc, l'explosió no sempre serà estrictament una BLEVE. Perquè ho sigui, cal que hi hagi un important sobreescalfament del líquid en el dipòsit i una despressurització instantània.

Diversos autors (Reid, 1979) han estudiat la manera d'establir la temperatura límit de sobreescalfament a partir de la qual, per a una substància determinada, l'explosió serà una BLEVE. Les condicions que teòricament limiten el sobreescalfament al qual pot produir-se la nucleació espontània i homogènia en el líquid poden establir-se a partir de la tangent a la corba pressió-temperatura en el punt crític. Això representa el límit a què pot escalfar-se el líquid abans que tinguin lloc la nucleació espontània i l'explosió.

La relació entre la pressió de vapor i la temperatura ve donada per l'equació de Clausius-Clapeyron:

$$\ln P = -\frac{A}{T} + B \quad [1]$$

Pot determinar-se l'equació de la línia tangent a la corba de saturació en el punt crític, i s'obté:

$$P = \operatorname{tg}\alpha \cdot T + b \quad [2]$$

Suposem, per exemple, un dipòsit que conté butà a temperatura ambient (20°C), amb vapor i líquid en equilibri (punt M de la figura 2). Si, a causa de la radiació despresa per un incendi, la temperatura augmenta fins a 70°C, la pressió en el dipòsit serà de 8 atm. Si, en aquestes condicions, el recipient esclata, hi haurà una despressurització des de 8 atm fins a la pressió atmosfèrica, corresponent a la línia NO. Com que aquesta línia no assoleix la tangent a la corba de saturació en el punt crític, segons la teoria àmpliament acceptada l'explosió no serà una BLEVE, tot i que hi haurà vaporització instantània i una forta explosió. En canvi, si durant l'es-

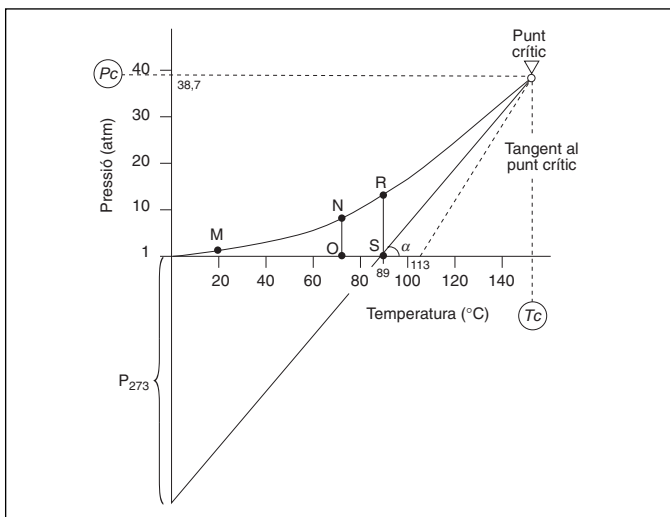


FIGURA 2. Corba de saturació per al butà i condicions límit per a la BLEVE.

calfament la temperatura del líquid assoleix els 89°C (punt R), durant la despressurització s'arribarà a la línia tangent (punt S). En aquest cas, hi haurà una nucleació espontània dins tota la massa de líquid i l'evaporació instantània serà pràcticament explosiva, amb la qual cosa s'originarà una BLEVE més violenta que en el cas anterior.

4. ESTIMACIÓ DELS EFECTES DE L'ACCIDENT BLEVE - BOLA DE FOC

Una BLEVE seguida d'una bola de foc produeix els efectes següents:

- radiació tèrmica
- ona de sobrepressió
- projecció de fragments.

La radiació tèrmica i l'ona de sobrepressió afectaran tota una zona, en principi circular, fins a una distància determinada. Els fragments projectats tindran, en canvi, una acció de tipus lineal o puntual.

A continuació s'exposa de manera breu la metodologia que pot emprar-se per a calcular de manera aproximada la intensitat (flux tèrmic, sobrepressió) i la distància assolida per aquests efectes. Una vegada quantificats, l'aplicació de models de vulnerabilitat o de valors llindar permet estimar-ne les conseqüències sobre persones o béns.

5. RADIACIÓ TÈRMICA

Quan en l'explosió BLEVE hi ha implicada una substància inflamable, sol formar-se una bola de foc que desprèn una intensa radiació: en un radi igual com a mínim al de la bola de foc (que pot arribar a ser de més de 150 m), la radiació

tèrmica és letal. És un fenomen molt ràpid, que elimina pràcticament la possibilitat de fugida de les persones properes i que ha ocasionat la mort de força persones (entre les quals, nombrosos bombers).

Els paràmetres que cal avaluar per predir la radiació tèrmica a una distància determinada són el diàmetre de la bola de foc i l'altura a la qual ascendeix i la radiació despresada des de la superfície de les flames. Diversos autors han proposat expressions per predir el diàmetre i la duració d'una bola de foc (Casal *et al.*, 2001). Les més àmpliament acceptades actualment són aquestes:

$$D = 6,14 \cdot M^{0,325} \quad [3]$$

$$t = 0,41 \cdot M^{0,340} \quad [4]$$

en què les unitats són m (D), kg (M) i s (t).

Evidentment, les prediccions fetes amb aquestes equacions són només aproximacions, ja que un càlcul exacte és pràcticament impossible. Una dificultat important és la constituïda per la impossibilitat de conèixer amb precisió la massa exacta de combustible en la bola de foc. Una part del combustible pot haver estat sortint per les vàlvules de seguretat durant una bona estona; una altra part pot haver sortit en forma de solc rere els fragments del dipòsit projectats en l'explosió; d'altra banda, és pràcticament impossible saber quin serà el grau d'ompliment del dipòsit el dia que hi hagi l'accident. És per això que alguns autors recomanen el criteri conservador de prendre com a massa de combustible en la bola de foc el 90 % de la cabuda del dipòsit.

Per estimar la radiació rebuda per una superfície situada a una distància determinada, pot emprar-se el model del cos sòlid:

$$I = \tau \cdot F \cdot E_p \quad [5]$$

Cal conèixer, doncs, el poder emissiu de la flama (E), el factor de vista (F), la transmissivitat atmosfèrica (τ) i la distància entre la flama i l'objectiu. Per calcular aquesta distància, cal saber l'altura a la qual ascendeix la bola de foc, que pot estimar-se mitjançant l'expressió següent:

$$H = 0,75 D, \quad [6]$$

en què H és l'altura (en m) a la qual es troba el centre de la bola de foc i D és el seu diàmetre.

El poder emissiu de la flama pot obtenir-se de l'equació següent:

$$E_p = \frac{\eta M H_c}{\pi D^2 t}, \quad [7]$$

394

en què H_c és la calor de combustió ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) i t , la durada de la bola de foc (s). η és la fracció de l'energia alliberada que és emesa en forma de radiació tèrmica; de fet, és la incertesa més gran en tot aquest càlcul. Ha estat proposada aquesta expressió (Roberts, 1982) per estimar-ne el valor:

$$\eta = 0,27 \cdot P_0^{0,32} \quad [8]$$

on P_0 és la pressió (relativa) en el recipient just abans de l'explosió, en MPa. El valor de η està comprès entre 0,13 i 0,40.

A causa de l'extrema simplicitat geomètrica del sistema, el factor de vista per a una superfície perpendicular a la bola de foc pot calcular-se amb una expressió molt senzilla:

$$F = \frac{D^2}{4 r^2}, \quad [9]$$

on r és la distància entre la superfície receptora i el centre de la bola de foc.

Finalment, la transmisivitat atmosfèrica pot estimar-se amb l'expressió següent:

$$\tau = 2,02 \cdot (P_w \cdot x)^{-0,09} \quad [10]$$

6. ENERGIA MECÀNICA ALLIBERADA EN L'EXPLOSIÓ

Quan un recipient esclata en una explosió BLEVE, l'energia mecànica que conté és alliberada instantàniament. Hi ha un augment molt important de volum a causa de l'expansió del vapor prèviament existent i de la vaporització instantània d'una part del líquid.

L'energia alliberada es distribueix, bàsicament, en els apartats següents:

- l'energia requerida per al trencament del recipient
- l'energia en l'ona de sobrepressió
- l'energia cinètica dels fragments.

És molt difícil establir amb precisió quina fracció de l'energia alliberada s'invertirà en la formació de l'ona de sobrepressió. Un aspecte molt important és el tipus de fractura (fràgil o dúctil) i l'eventual acció de les flames sobre les parets. S'ha suggerit que, en el trencament fràgil d'un recipient, el 80% de l'energia alliberada contribueix a l'ona de sobrepressió, mentre que si el trencament és dúctil (que és el cas més usual) l'energia en l'ona és només un 40%. En ambdós casos, la resta de l'energia s'inverteix pràcticament tota en el trencament i en l'energia cinètica dels fragments.

Pel que fa al vapor inicialment present en el recipient, l'energia alliberada en la seva expansió és:

$$E_v = m(u_1 - u_2), \quad [11]$$

on E_v és l'energia alliberada en l'expansió del vapor (kJ), m és la massa de vapor que ja existia en el recipient en el moment del trencament (kg), u_1 és l'energia interna del vapor en les condicions de trencament ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) i u_2 és l'energia interna del vapor després de l'expansió fins a la pressió atmosfèrica ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Suposant que l'expansió és isoentròpica —simplificació que termodinàmicament no és gaire correcta però que sol aplicar-se— i que el vapor es comporta com un gas ideal, aquesta energia és (Prugh, 1991):

$$E_v = 10^2 \cdot \left(\frac{P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right), \quad [12]$$

396

on P_a és la pressió atmosfèrica (bar), V és el volum inicial de vapor (m^3), γ és la relació de calors específiques i P és la pressió (bar) en el recipient just abans de l'explosió.

Aquesta energia pot expressar-se en forma de massa equivalent de TNT mitjançant el factor de conversió adient (aproximadament 1.120 cal per gram de TNT):

$$W_{\text{TNT}} = \left(\frac{0,021 \cdot P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right), \quad [13]$$

on W_{TNT} és la massa equivalent de TNT (kg).

Si, a més a més, el recipient contenia líquid sobreescalfat —com és el cas en les explosions BLEVE—, cal tenir en compte que la massa de líquid s'evaporarà parcialment i sobtadament en trobar-se a la pressió atmosfèrica. El volum d'aquest vapor a la pressió del recipient just abans de l'ex-

plosió s'ha d'afegir al volum real; la massa equivalent de TNT és llavors:

$$W_{\text{TNT}} = \left(\frac{0,021 \cdot P \cdot V^*}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right), \quad [14]$$

on V^* és el volum del vapor en el recipient més el volum (a la pressió dins del recipient) del vapor generat en l'explosió, en m^3 :

$$V^* = V + V_l f \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \quad [15]$$

V és el volum de vapor dins el recipient abans de l'explosió, V_l és el volum de líquid en el recipient abans de l'explosió (m^3) i f és la fracció vaporitzada (*flash*), és a dir, la fracció de líquid que s'evapora en la despressurització; el seu valor pot calcular-se mitjançant l'expressió següent:

$$f = 1 - e^{\left(-2,63 \cdot \frac{C_p}{H_v} \cdot (T_c - T_b) \cdot \left(1 - \left(\frac{T_c - T_b}{T_c - T_0} \right)^{0,38} \right) \right)}, \quad [16]$$

on T_c és la temperatura crítica de la substància (K), T_b és la temperatura d'ebullició de la substància a la pressió atmosfèrica (K), T_0 és la temperatura de la substància en el moment de l'explosió (K) i H_v és l'entalpia d'evaporació de la substància ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Han estat proposats altres mètodes per calcular l'energia alliberada en l'explosió. Entre aquests cal esmentar el denominat *mètode de Brode* —probablement el més senzill—, que determina l'energia requerida per elevar la pressió del gas a volum constant des de la pressió ambient fins a la pressió de trencament del recipient. Un altre és el que suposa que el gas s'expandeix isotèrmicament. Finalment, un altre encara està basat en l'aplicació de l'exergia o disponibilitat ter-

modinàmica (Crowl, 2003). Tots donen valors superiors als obtinguts en el procediment basat en la suposició de procés isoentròpic. Donen, doncs, valors de l'energia excessivament elevats, que condueixen a resultats excessivament conservadors en aplicar-los a la pràctica.

Recentment ha estat proposat un altre procediment per calcular l'energia alliberada en l'explosió, basat en la suposició d'un procés d'expansió adiabàtic i irreversible (Planas-Cuchi *et al.*, 2004), condicions molt més properes a les existents en la realitat.

7. ONA DE SOBREPRESSIÓ

La sobrepressió generada per l'explosió pot estimar-se a partir de la massa equivalent de TNT. Aquest mètode implica una certa imprecisió, però és senzill i permet fer estimacions útils.

A causa del fet que l'energia alliberada ocupava inicialment un volum molt més gran que el que ocuparia la massa equivalent de TNT, cal corregir la distància des del centre de l'explosió fins al lloc on es vol estimar la sobrepressió. Aquesta correcció es fa utilitzant la distància «escalada», basada en el principi de similitud de Hopkinson. La distància escalada està relacionada amb la distància real i amb la massa equivalent de TNT mitjançant l'expressió següent:

$$d_n = \frac{d}{(\beta \cdot W_{\text{TNT}})^{1/3}}, \quad [17]$$

on d_n és la distància escalada ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$), β és la fracció de l'energia alliberada convertida en sobrepressió i d és la distància real (des del centre de l'explosió) a la qual es vol

estimar la sobrepressió (m). Del valor de d_n , és possible obtenir-ne la sobrepressió mitjançant la representació gràfica adient (Casal *et al.*, 2001).

8. FRAGMENTS

Els efectes dels fragments projectats per l'explosió són molt difícils de quantificar per la seva naturalesa aleatòria. Tenen una acció restringida i direccional o puntual, però amb un radi més gran que el corresponent als efectes tèrmics i a la sobrepressió; d'altra banda, poden originar efecte dòmino sobre altres equips.

El nombre de projectils «primaris» (és a dir, grans trossos del dipòsit) depèn del tipus de trencament i de la forma del dipòsit. En el cas de dipòsits cilíndrics, solen trencar-se en dos trossos: el fons i la resta del dipòsit. També és possible la formació de tres grans fragments: dos fons i la resta del dipòsit, o bé un fons i la resta del dipòsit que es divideix en altres dues peces seguint la línia imaginària que separaria el líquid del vapor (figura 3). Les fissures sovint segueixen les soldadures.

399

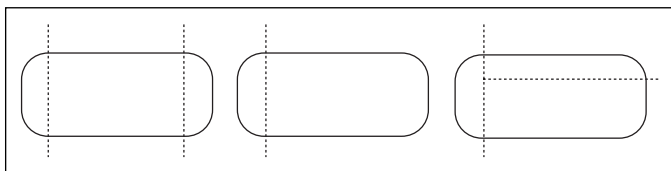


FIGURA 3. *Trencaments típics en recipients cilíndrics.*

Pel que fa a la direcció, els fragments de recipients cilíndrics tendeixen a seguir la direcció de l'eix del cilindre. La taula i la figura adjuntes mostren les dades de quinze accidents (Holden i Reeves, 1985). La màxima distància

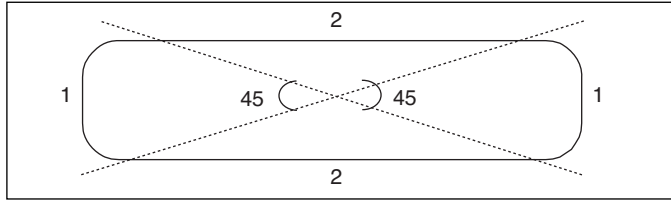


FIGURA 4. Distribució dels projectils d'un recipient cilíndric.

assolida per un d'aquests fragments ha estat de 1.100 m (accident de San Juan Ixhuatepec, 1984).

TAULA 3. Probabilitat de direcció de fragments en recipients cilíndrics

Sector	Probabilitat
1	0,62
2	0,38

400

Els fragments procedents de recipients esfèrics solen assolir distàncies menors que els de recipients cilíndrics, ja que són menys aerodinàmics. La màxima distància assolida per un d'aquests fragments ha estat de 600 m (accident de San Juan Ixhuatepec, 1984). D'altra banda, és pràcticament impossible predir cap on aniran.

9. MESURES DE PREVENCIÓ

En cas d'una emergència que pugui conduir a un accident del tipus BLEVE - bola de foc, és molt difícil improvisar accions per controlar la situació i, per tant, la mesura més recomanable és l'evacuació de la gent fins a distàncies d'aproximadament 1 km. Qualsevol acció que impliqui la presència de persones és molt perillosa, ja que és impossible predir quan

tindrà lloc l'explosió. Les mesures, que permeten reduir el risc de BLEVE a nivells tolerables, han d'haver estat adoptades, doncs, prèviament. Poden esmentar-se les següents:

- terreny en pendent (i drenatge de qualsevol fuita)
- aïllament tèrmic del dipòsit
- refrigeració amb aigua del dipòsit
- enterrament del dipòsit (mesura que té molts detractors)
- reducció de la pressió amb vàlvules de seguretat
- protecció d'impactes mecànics
- control de sobreiximents
- distàncies mínimes de separació entre equips.

10. NOMENCLATURA

<i>A</i>	constant en l'equació de Clausius-Clapeyron
<i>B</i>	constant en l'equació de Clausius-Clapeyron
<i>b</i>	constant
<i>C_p</i>	calor específica a pressió constant ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
<i>D</i>	diàmetre de la bola de foc (m)
<i>d_n</i>	distància escalada ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)
<i>E_p</i>	poder emissiu ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)
<i>E_r</i>	energia alliberada en l'expansió del vapor (kJ)
<i>F</i>	factor de vista
<i>f</i>	factor de vaporització
<i>H</i>	altura a què es troba el centre de la bola de foc (m)
<i>H_c</i>	calor de combustió ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
<i>H_v</i>	entalpia d'evaporació ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
<i>I</i>	intensitat de radiació ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)
<i>M</i>	massa de combustible (kg)
<i>m</i>	massa de vapor existent inicialment (kg)
<i>P</i>	pressió de vapor (bar)
<i>P_a</i>	pressió atmosfèrica (bar)

P_0	pressió relativa (bar)
P_c	pressió parcial de l'aigua (Pa)
T	temperatura (K)
T_c	temperatura crítica (K)
T_b	temperatura d'ebullició (K)
T_0	temperatura de la substància en el moment de l'explosió (K)
t	temps (s)
u	energia interna del vapor ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
V	volum de vapor en el recipient (m^3)
V_l	volum de líquid en el recipient just abans de l'explosió (m^3)
x	distància entre la superfície de la flama i l'objectiu (m)
W_{TNT}	massa equivalent de TNT (kg)
α	angle format per l'eix d'abscisses i la tangent a la corba de saturació en el punt crític ($^\circ$)
β	fracció de l'energia alliberada convertida en sobrepressió
γ	relació de calors específiques
η	coeficient de radiació
ρ_l	densitat del líquid ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
ρ_v	densitat del vapor ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
τ	transmissivitat atmosfèrica

BIBLIOGRAFIA

- BAGSTER, D. F.; PITBLADO, R. M. (1989). «Thermal hazards in the process industry». *Chem. Eng. Prog.*, p. 69-75.
- BAUM, M. R. «Failure of a horizontal pressure vessel containing a high temperature liquid: The velocity of end-cap and rocket missiles». *J. Loss Prev. Process Ind.*, núm. 12, p. 137-145, 1999.
- BESTRATÉN, M.; TURMO, E. (1991). *Explosiones BLEVE (I): Evaluación de la radiación térmica*. Barcelona: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. [Nota técnica de prevención NTP-293]

- (1991). *Explosiones BLEVE (II): Medidas preventivas*. Barcelona: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. [Nota técnica de prevención NTP-294]
- BIRK, A. M. (1996). «Hazards from Propane BLEVEs: An Update and Proposal for Emergency Responders». *J. Loss Prev. Process Ind.*, núm. 9, p. 173-181.
- CASAL, J.; ARNALDOS, J.; MONTIEL, H.; PLANAS-CUCHI, E.; VÍLCHEZ, J. A. (2001). «Modelling and understanding BLEVE». A: FINGAS, M. [ed.]. *The handbook of hazardous materials spills technology*, p. 22.1-22.27. Nova York: McGrawHill.
- CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J. A. (2001). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Mèxic: Alfaomega.
- CROWL, D. A. (2003). *Understanding explosions*. Nova York: CCPS.
- HOLDEN, P. L.; REEVES, A. B. (1985). «Fragment hazards from failures of pressurized liquefied gas vessels». *Chem. Eng. Symp. Ser.*, núm. 93, p. 205-217.
- PLANAS-CUCHI, E.; SALLA, J. M.; CASAL, J. (2004). «Calculating overpressure from BLEVE explosions». *J. Loss Prev. Process Ind.*
- PRUGH, R. W. «Quantify BLEVE hazards». *Chem. Eng. Progr.* (febrer 1991), p. 66-72.
- REID, R. C. (1979). «Possible Mechanism for Pressurized-Liquid Tank Explosions or BLEVEs», *Science*, núm. 203, p. 1263-1265.
- ROBERTS, A. F. (1982). *J. Fire Safety Studies*, núm. 4, p. 197-201.
- SATYANARAYANA, K.; BORAH, M.; RAO, P. G. (1991). «Prediction of thermal hazards from fireballs», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 4, p. 344-347.
- VÍLCHEZ, J. A.; PLANAS-CUCHI, E.; CASAL, J. (1993). «Safety measures in LPG storage design», *Proceedings of the 6th Mediterranean Congress on Chemical Engineering*, vol. 1, p. 353-354. Barcelona: Fira Barcelona.