

Treball fi de màster

Estudi tècnic-forense d'explosions de núvols de vapor no confinats, (UVCE)



Autora:

Srta. Karen Martí Torres

Tutor acadèmic:

Dr. Josep Maria Serres Serres

Tutor entitat col·laboradora:

Dr. Vicent Pons i Grau

Tarragona, juny de 2018

D. Vicent Pons i Grau, Dr. Enginyer Industrial i Enginyer Químic IQS, CEO de la *Oficina Técnica de Ingeniería Forense* amb domicili al carrer de Xile, 13, Valencia.

EXPOSA

Que **Na Karen Martí Torres**, graduada en química per la Universitat de Barcelona, ha realitzat el treball fi de màster en aquesta empresa superant el temps de 180 hores.

Durant aquesta estància ha demostrat el seu interès, realitzant les tasques encomanades i participant, en companyia d'alguns tècnics, en inspeccions de camp, per a finalment confeccionar el projecte de fi de màster.

El personal d'aquesta oficina queda satisfet del comportament i interès demostrat en tots els quefers que se li han confiat, i en la redacció del present treball.

Valencia, a 15 de juny de 2018.



Signa: Vicent Pons i Grau

AGRAÏMENTS

Nihil fieri potest sine causa
Oficina Técnica de Ingeniería Forense

M'agradaria agrair a la Oficina Técnica de Ingeniería Forense l'oportunitat que em va brindar al acceptar-me a la seva empresa i deixar-me concloure aquesta etapa d'una forma tant enriquidora.

Voldria,

Donar les gràcies especialment als tècnics Isidro, Adrián i Jorge per transmetre'm els vostres coneixements i involucrar-me tant en les sortides de camp.

Expressar la meua gratitud a Amparo per estar sempre preparada i trobar-me una solució a qualsevol problema que he tingut.

Apreciar el detall de Vicent Pons i Frigola per totes les correccions aportades desinteressadament.

Valorar el temps d'Òscar per la seva companyia a les visites d'institucions externes i per posar-m'ho tot més fàcil.

I, en particular, reconèixer l'esforç del meu tutor Vicent Pons i Grau, per confiar en mi i donar-me aquesta oportunitat, però sobretot per fer-me riure cada dia i ensenyar-me tant sobre química, enginyeria forense, cultura i donar-me lliçons de vida en general. Em conformaria en tenir la meitat de la seva saviesa.

A tots, moltes gràcies per l'atenció contínua que m'heu mostrat durant aquests mesos i fer-me sentir com una més de vosaltres. Però sobretot moltes gràcies a tots per no deixar-me sola en un dels moments més difícils que, per sort, tot es va quedar en un ensurt.

Agrair també a Josep M^a Serres l'interès i la dedicació mostrats durant tot el procés. Gràcies per haver-me recolzat tot i la distància.

És arribat aquest punt quan t'adones del camí que has recorregut i de tot el que t'emportes amb ell.

Records i persones que mai s'esborraran.

La meua satisfacció més gran és acabar donant les gràcies als meus pares per creure en mi fins i tot quan jo no se fer-ho. Gràcies per estar sempre. Així com també al meu germà, per ser tant especial i estimar-me tant. Als tres, i a la resta de familiars i amics que realment esteu aquí incondicionalment, gràcies per ser-ho tot.

RESUM

Durant els últims anys, les devastadores explosions de núvols de vapor no confinades, UVCE, de l'anglès *Unconfined Vapour Cloud Explosion*, han cridat considerablement l'atenció.

Les explosions UVCE solen succeir principalment en el sector químic, sobretot en refineries, indústries petroquímiques, transvasament de líquids, transport de mercaderies perilloses, i també en empreses on s'empra algun líquid inflamable que s'utilitza en alguna fase del procés productiu.

Són explosions difícils de preveure i els seus efectes resulten majoritàriament desastrosos, tant des del punt de vista econòmic, com desgraciadament, de la presència de víctimes.

Aquest treball s'ha realitzat en l'empresa OTIF (*Oficina Técnica de Ingeniería Forense*), empresa fundada al 1984 i dedicada, amb una ampla i reconeguda experiència, a la determinació de l'origen i les causes de tota classe de sinistres, especialment, en el camp de la investigació i simulació d'incendis i explosions, així com en la confecció de plans d'emergència.

Després de la bibliografia consultada i dels treballs de camp acompanyant a alguns tècnics d'aquesta empresa, en concret sinistres en empreses químiques com a conseqüència de fallades en processos d'enginyeria química, es proposa una metodologia a seguir per a l'anàlisi, la investigació i la prevenció de les explosions UVCE.

Paraules clau:

ciència forense, química forense, sobrepressió, UVCE, HAZOP.

RESUMEN

Durante los últimos años, las devastadoras explosiones de nubes de vapor no confinadas, UVCE, del inglés *Unconfined Vapour Cloud Explosion*, han llamado considerablemente la atención.

Las explosiones UVCE suelen suceder principalmente en el sector químico, sobretudo en refinerías, industrias petroquímicas, transvase de líquidos, transporte de mercaderías peligrosas, y también en empresas donde se maneja algún líquido inflamable que se utiliza en alguna fase del proceso productivo.

Son explosiones difíciles de prever y sus efectos resultan mayoritariamente desastrosos, tanto desde el punto de vista económico, como desgraciadamente, de la presencia de víctimas.

Este trabajo se ha realizado en la empresa OTIF (Oficina Técnica de Ingeniería Forense), empresa fundada el 1984 y dedicada, con una amplia y reconocida experiencia, a la determinación del origen y las causas de toda clase de siniestros, especialmente, en el campo de la investigación y simulación de incendios y explosiones, así como en la confección de planos de emergencia.

Después de la bibliografía consultada y de los trabajos de campo acompañando a algunos técnicos de esta empresa, en concreto siniestros en empresas químicas como consecuencia de falladas en procesos de ingeniería química, se propone una metodología a seguir para el análisis, la investigación y la prevención de las explosiones UVCE.

Palabras clave:

ciencia forense, química forense, sobrepresión, UVCE, HAZOP.

ABSTRACT

In recent years, the devastating Unconfined Vapour Cloud Explosions (UVCE) have significantly attracted the attention.

The UCVE explosions tend to occur mainly in the chemical sector, especially in refineries, petrochemical industries, transfer of liquids, transport of dangerous goods and, also in companies using flammable liquid at some stage of the productive process.

These explosions are hard to foresee and the effects are mainly atrocious, both economic and, unfortunately, standing of victims.

This work has been done at the company OTIC (*Oficina Técnica de Ingeniería Forense*), a company founded in 1984 and dedicated, with extensive and proven experience, to the determination of the origin and the causes of incidents, especially in the field of investigation and modeling fire and explosions, as well as in the elaboration of emergency plans.

After the search in the literature and the fieldwork with the technics of this company, concretely, casualties to chemical industries due to failures in chemical engineering process, it is proposed a methodology for the analysis, investigation and prevention of the UVCE.

Keywords:

Forensic science, forensic chemistry, overpressure, UVCE, HAZOP.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. QUÍMICA FORENSE	1
1.2. EXPLOSIONS	2
2. OBJECTIUS DEL PROJECTE.....	4
3. PROTOCOL SEGUIT EN EL DESENVOLUPAMENT DEL PRESENT TREBALL	5
4. RESSENYA DE LES EXPLOSIONS DE NÚVOLS DE VAPOR NO CONFINATS	6
4.1. POSSIBLES FONTS D'IGNICIÓ EN LES UVCE	8
4.2. FACTORS QUE INTERVENEN EN LES UVCE	8
4.3. AVALUACIÓ I QUANTIFICACIÓ DELS EFECTES I CONSEQÜÈNCIES DE LES UVCE.....	8
4.3.1. Mètodes per a la identificació de riscos en la indústria química.....	9
4.4. PREVENCIÓ DE LES UVCE.....	12
4.5. EXEMPLES D'EXPLOSIONS UVCE	13
4.6. METODOLOGIA D'INVESTIGACIÓ D'INCENDIS I EXPLOSIONS	16
4.6.1. Mètodes d'identificació d'explosions UVCE	17
4.7. CASOS D'ESTUDI	17
5. RESULTATS I DISCUSSIONS.....	26
6. CONCLUSIONS.....	31
7. BIBLIOGRAFIA	32

I. INTRODUCCIÓ

La ciència forense és l'aplicació de pràctiques científiques i tècniques a procediments legals per a dilucidar qüestions de causa-efecte. A mesura que aquest binomi ha anat creixent, els tribunals de justícia han precisat de noves branques de la ciència i tecnologia per a resoldre alguns procediments legals, apareixent així les ciències forenses no mèdiques, que engloben una extensa gama de disciplines.

Dintre de l'ampli espectre de les ciències forenses no mèdiques, una de les branques és la dedicada a l'estudi de l'origen i la causa de sinistres conseqüència d'incendis i explosions. Es tracta de realitzar una interpretació correcta i veritable dels fets succeïts i poder així, proposar un model acord amb la realitat de l'esdeveniment.

Un cop s'ha realitzat la investigació i s'han determinat i corroborat els fets, cal redactar un informe que més d'una vegada es presentarà als tribunals de justícia o corts d'arbitratge, únics organismes competents per a determinar possibles responsabilitats. L'informe ha de ser clar i concís, sobretot perquè s'inclouen conceptes tècnics que no s'imparteixen a les facultats de Dret.

Determinar el per què d'un sinistre és fonamental per a poder estudiar noves formes de prevenció i tècniques de protecció per a mitigar-ne els efectes.^{1,2,6}

I.1. QUÍMICA FORENSE

La química és una de les bases de les ciències forenses no mèdiques, ja que l'origen i la causa de molts sinistres, la majoria d'ells conseqüència del desenvolupament tecnològic, estan relacionats amb aquesta disciplina.

En els estudis de les causes de sinistres deguts a procediments químics, els coneixements de la termoquímica són fonamentals, sobretot els referents al segon principi de la termodinàmica, on es parla d'entropia.

La entropia fa referència a la tendència al desordre que, en el present cas podem dir, la tendència a que es produeixi el fenomen que més desastre ocasiona.

Aquesta, dóna explicació al fet de que davant d'una font d'ignició, primer cremarà aquella substància que més energia despendrà, és a dir, la que més desordre generarà. Això explica una de les tècniques d'extinció mitjançant l'ús d'explosius. ¹¹

La química forense intervé, principalment, en els següents àmbits:

- a. Contaminació ambiental
- b. Investigació d'incendis i explosions
- c. Responsabilitat civil de productes
- d. Processos químics arran dels quals té lloc un sinistre
- e. Transport de mercaderies perilloses/transvasament de líquids inflamables

Aquest treball es centra en la investigació d'incendis i d'explosions químiques, concretament, en la singular explosió de núvols de vapor no confinats, un tipus d'explosions químiques que per desgràcia, són generadores de danys colaterals severos.

1.2. EXPLOSIONS

Una explosió bàsicament és un alliberament brusc d'una ona d'alta pressió a l'ambient. És a dir, es tracta d'un alliberament sobtat y violent d'energia que genera un augment de pressió.

Les explosions es classifiquen segons la seva causa en:

- Explosions físiques: expansions brusques de gasos comprimits.
- Explosions químiques: reaccions químiques exotèrmiques que transcorren a gran velocitat.
- Explosions nuclears: reaccions nuclears de fissió y fusió.

Segons la forma, les condicions i la propagació, les explosions químiques poden desencadenar un fenomen de deflagració o de detonació.

En dinàmica de focs, les deflagracions són incendis en els quals la velocitat de propagació d'aquests està entre 1 cm/s i la velocitat del so. A diferència de les detonacions que són incendis determinats per una velocitat de propagació superior a la del so. ^{3, 4, 5}

En la Figura 1, es mostra un esquema de la classificació dels diferents tipus d'explosions químiques: ¹⁹

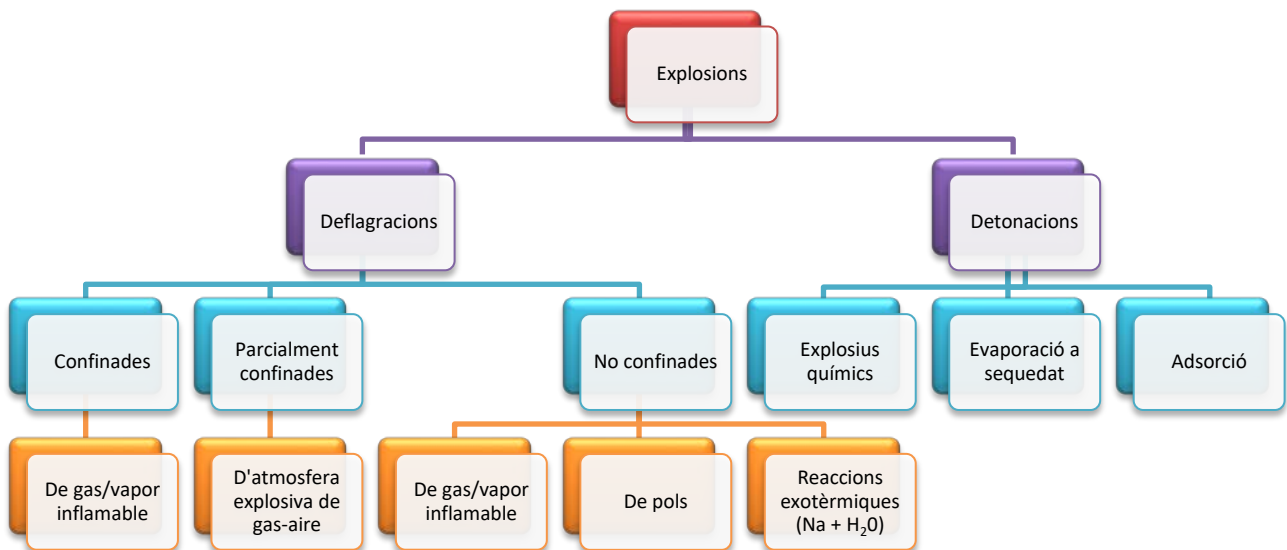


Figura 1. Classificació dels diferents tipus d'explosions químiques.

2. OBJECTIUS DEL PROJECTE

L'objectiu principal és realitzar un estudi tècnic-forense sobre les explosions de núvols de vapor no confinats. En base a tot això, es delimiten les característiques més identificadores dels fets objectius que determinen la causa, dinàmica i conseqüències d'aquestes, s'aporten casos significatius d'explosions UVCE reals que han estat investigades i s'exposa la metodologia que s'ha seguit.

Per tant, de manera més específica, els objectius del treball són:

- Revisar els estudis sobre explosions UVCE.
- Identificar les possibles causes que donen gènesis a dites explosions.
- Determinar els principals efectes d'aquestes explosions.
- Participació en l'estudi i anàlisi de dos casos reals.

3. PROTOCOL SEGUIT EN EL DESENVOLUPAMENT DEL PRESENT TREBALL

Aquest treball de fi de màster s'ha desenvolupat en la *Oficina Técnica de Ingeniería Forense* durant el període del 10 d'abril al 15 de juny del 2018, seguint l'organigrama següent:

- 1) Bibliografia i estudi de sinistres/successos relacionats en el món del foc i les explosions.
- 2) Coneixements i pràctica d'alguns instruments que s'utilitzen en l'empresa, concretament el microscopi òptic, la càmera termogràfica i l'escleròmetre.



Il·lustració 1. Microscopi òptic. **Il·lustració 2.** Càmera termogràfica. **Il·lustració 3.** Escleròmetre.

- 3) Treball de camp acompanyant a alguns tècnics a realitzar la inspecció de l'escenari de l'incendi.
- 4) Assistència a les reunions de l'empresa on es desenvolupava una pluja d'idees (*brainstorming*).
- 5) Coneixement de les normes de prevenció de riscos laborals en el transport i transvasament de productes químics, reglament d'emmagatzematge de productes químics, etc.
- 6) Visites al ITQ (*Instituto Tecnológico de Química*) de la UPV, Universitat Politècnica de València, dirigit pel professor Dr. Avelino Corma, on des de l'empresa es porten a analitzar, fonamentalment, mostres de residus de líquids inflamables.

4. RESSENYA DE LES EXPLOSIONS DE NÚVOLS DE VAPOR NO CONFINATS

L'explosió d'un núvol de vapor no confinat, traducció de l'expressió anglesa, *Unconfined Vapour Cloud Explosion*, amb acrònim UVCE, es pot definir com una deflagració d'un núvol de gas/vapor inflamable que es troba en un espai ampli, i la seva ona de pressió assoleix una sobrepressió mínima de l'ordre d'1 bar en la zona d'ignició.

Aquest tipus d'explosions s'originen degut a una fuga de gran quantitat de gas o vapor inflamable o bé per evaporació ràpida d'un vessament de líquid inflamable, que es dispersa i es concentra en un punt separat del punt on es produeix la fuga, i entra en contacte en una font d'ignició.

En qualsevol cas, una vegada format el núvol, poden donar-se les següents circumstàncies:

- Dispersar-se a l'aire abans de que es produeixi la ignició, sense causar danys.
- Prendre immediatament iniciant un incendi, sense explosió i amb danys menors.
- Dispersar-se en una àrea extensa i produir-se la ignició després d'un cert temps, formant-se una gran flama que genera una ona de sobrepressió, produint així les explosions UVCE, protagonistes del present treball.

Així, es poden establir diferents etapes en la successió de les UVCE:

- Alliberament atmosfèric de gas/vapor procedent d'un líquid inflamable.
- Barreja d'aquest producte amb un agent comburent (com l'oxigen de l'aire) per a formar una mescla explosiva.
- Ignició del núvol quan es troba amb una font de calor.
- Explosió del núvol de la barreja gas/vapor inflamable-oxigen.

Aquestes explosions són més freqüents quan els vapors procedents del líquid inflamable són més densos que l'aire. Ja que, el vapor format s'espargeix arran de terra, amb el qual queda fàcilment acumulat en els embornals, interior de canonades, semi-soterranis, etc.

A partir d'això, el vapor acumulat assoleix una espessor arribant a topar amb fonts d'ignició, com un endoll, motors, etc. Així, per exemple, són més freqüents les explosions UVCE de butà o propà que de gas natural, ja que són vapors més densos que l'aire:

<i>densitat del propà</i>	→	<i>1.56 g/mL</i>
<i>densitat del butà</i>	→	<i>2.06 g/mL</i>
<i>densitat del gas natural</i>	→	<i>0.80 g/mL</i>

Una de les explosions UVCE més habituals són les de dissolvents de pintures i les de l'acetona i els seus derivats, sobretot el metil-etil-cetona, conegut comercialment com MEK i emprat àmpliament en la indústria química.

Aquest tipus d'explosions poden succeir en:

- Indústries de sector químic, preferentment petroquímiques i refineries.
- Indústries no químiques on s'empren dissolvents per a netejar màquines o eines de treball.
- Indústries que, en determinades ocasions, utilitzen dissolvents per a fer tasques de manteniment i/o reparacions, com per exemple pintar.

Segons la NTP 321 (1991), el nombre d'accidents d'aquest tipus ha augmentat notablement durant els anys, passant de 4 per dècada al 1930 a uns 60 durant el mateix període en les dos últimes dècades.

Un dels sinistres més investigats va ser el desastrós accident ocorregut l'any 1974 a Flixborough, Anglaterra, causat pel trencament d'una canonada de 0.5m de diàmetre, la qual va provocar la fugida de 45 tones de ciclohexà, que al evaporar-se va formar un núvol de vapor no confinat.

Un punt d'ignició dintre de la mateixa planta va començar una flama que, posteriorment, es va accelerar formant una ona de sobrepressió que va destruir tota la planta, afectant també a les cases situades a més d'1 km del seu entorn. ^{13, 17, 18}

4.1. POSSIBLES FONTS D'IGNICIÓ EN LES UVCE

Les possibles fonts d'ignició poden ser:

- Espurna elèctrica, deguda a la ruptura de corrent d'un circuit generada per alguna maniobra.
- Electricitat estàtica, molt freqüent segons la NTP 225.
- Flama oberta, com un cremador de forn.
- Espurna mecànica, calor de fricció.
- Formació de mescles autoexplosives per evaporació a sequedat, peròxids, etc.

4.2. FACTORS QUE INTERVENEN EN LES UVCE

Per a que es produeixi una explosió d'un núvol de vapor no confinat s'han de complir les següents condicions:

- Primerament, el material alliberat a l'atmosfera haurà de ser inflamable, i, a més, la ignició no haurà de ser immediata.
- Una vegada format aquest núvol, la mescla gas/vapor inflamable-aire, haurà d'estar entre els límits inferior i superior de la inflamabilitat. Aquest límits son característics de cada producte.

4.3. AVALUACIÓ I QUANTIFICACIÓ DELS EFECTES I CONSEQÜÈNCIES DE LES UVCE

Com ja s'ha comentat anteriorment, l'efecte principal de les explosions és la generació d'una ona de sobrepressió. Per poder tenir una quantificació encertada dels efectes d'una explosió UVCE, es requereix de la determinació de l'evolució en el temps de l'ona de sobrepressió.

Els models existents per a quantificar aquests efectes requereixen una sèrie de paràmetres per a poder caracteritzar l'ona de sobrepressió. Per definir aquests paràmetres s'utilitza una idealització de l'ona de sobrepressió.

Es pot constatar que, en tots els casos, l'arribada d'una ona de sobrepressió es caracteritza per un augment brusc de la pressió en el temps (fase positiva), seguit d'un descens d'aquesta fins a valors per sota de la pressió atmosfèrica (fase negativa), amb una estabilització final, tal i com s'observa a la Figura 2.

10, 14, 15, 16

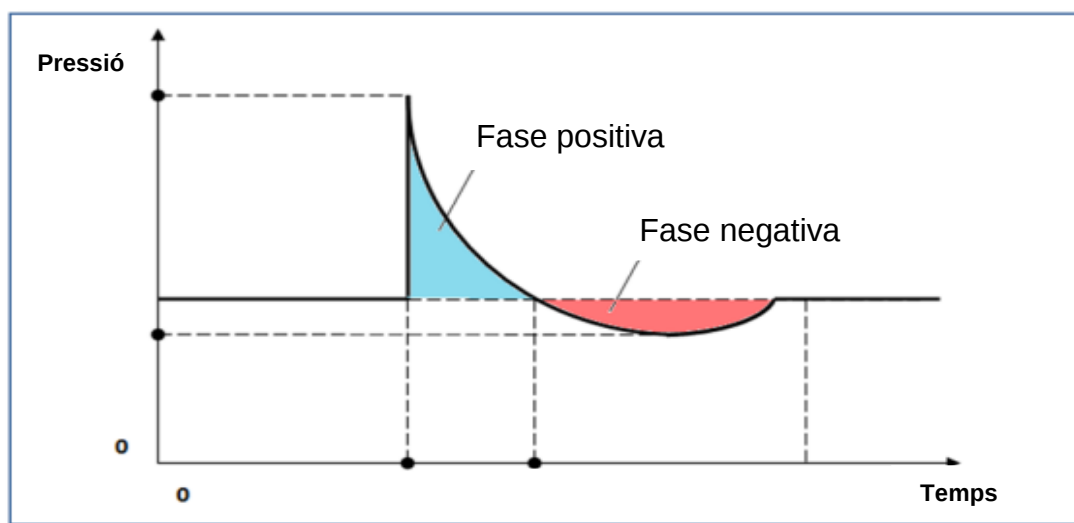


Figura 2. Variació de l'ona de sobrepressió d'una explosió en funció del temps.

4.3.1. Mètodes per a la identificació de riscos en la indústria química

A l'hora d'establir les circumstàncies que han provocat un determinat succés, és imprescindible conèixer quines parts són les més vulnerables.

Actualment, existeixen una sèrie de mètodes d'identificació que ens proporcionen aquesta informació. L'elecció d'aquest dependrà del propòsit. A continuació es mostra una classificació de les diferents eines que existeixen per a identificar perills: 7, 8, 11, 16

I. Llistes de verificació

Una llista de verificació és una eina que aprofita les lliçons d'experiències passades. Cada etapa d'un procés requereix una llista específica, començant per les de propietats principals dels compostos i la de les característiques dels processos, i acabant per les auditories d'operació.

Un dels mètodes que utilitza aquesta eina és el HAZID, especialment en les etapes inicials del disseny del procés.

II. Índexs de perillositat

Darrerament, s'han desenvolupat una sèrie d'índexs que intenten relacionar la perillositat associada a un procés amb una escala de valors.

Un dels més emprats és l'*Índex Dow*, publicat el 1964, que s'emprava per a seleccionar els equipaments de protecció contra incendis, incloent, en els últims anys, la Parada de Negoci.

Un altre dels índex interessants és l'*Índex Mond*, desenvolupat el 1979, va néixer com una extensió de l'*Índex Dow*, amb l'objectiu d'ampliar el rang de processos i les instal·lacions d'emmagatzematge, i contemplar la avaluació de la toxicitat dels productes.

III. Estudis del tipus "Què passaria si...?"

És un dels mètodes més antics que existeix i consisteix en realitzar una sèrie de preguntes del tipus "Que passaria si...?"

IV. Arbre d'esdeveniments i arbre de fallades

L'anàlisi mitjançant un arbre d'esdeveniments desenvolupa les conseqüències que s'originen a partir d'un succés determinat, és a dir, detalla l'acció que produeix el sinistre i en descriu les possibles conseqüències.

En el cas de l'anàlisi mitjançant un arbre de fallades, l'estudi realitzat és el contrari, és a dir, es desenvolupen les possibles causes i errors que poden desencadenar un succés.

V. Estudis d'operativitat (HAZOP)

HAZOP, *Hazard and Operability Studies* (estudis de perill i operativitat), és una tècnica desenvolupada per enginyers de seguretat de la companyia *Imperial Chemical Industries*. La seva funció és identificar els perills relatius als processos que transcorren en una planta mitjançant una anàlisi sistematitzat d'un problema a partir del plantejament i respostes d'una sèrie de preguntes.

Es tracta de revisar, part per part, la planta i estudiar com es veurien afectats els processos si es produís alguna desviació en alguns dels valors normals d'operació.

Aquest procés requereix una descripció detallada del disseny de la planta i un coneixement complet de tots els processos que s'hi duen a terme en aquesta.

Després d'examinar-ne els resultats, es proposen accions per a posar remei a les situacions anòmales que s'hagin pogut plantejar en la fase anterior.

4.4. PREVENCIÓ DE LES UVCE

La normativa fa referència, principalment, a les condicions ambientals en les quals s'aconsella que siguin dutes a terme les següents operacions: espais al aire lliure i ben ventilats, evasió de possibles fonts de calor en les immediacions, instal·lacions elèctriques antideflagrants, etc.

No obstant, tot i haver mil i una causes que poden produir explosions UVCE, una de les fonts d'ignició que major nombre n'ocasiona és l'electricitat estàtica.

Com diu la NTP 225, la generació d'aquestes càrregues electrostàtiques es produeix fonamentalment:

- Al fluir el líquid per una canalització i mitjançant filtres, vàlvules o bombes.
- Al sortir el líquid projectat a través de la boca d'impulsió.
- Al caure el líquid a l'interior de recipients per al seu compliment, amb el consegüent moviment sobre les parets, generant turbulències i esquitxos.
- Al remoure's el líquid al recipient contenidor, ja sigui en operacions de transport o d'agitació i mescla.
- No portar els EPI's escaients.

Existeixen moltes normes per a evitar la ignició del vapor per la presència d'electricitat estàtica. Un exemple seria la roba que porten els operaris en aquest tipus d'operacions. Aquesta ha de ser adequada a l'establert al Real Decret 681/2003, on es conclouen una sèrie de pautes per a l'avaluació dels riscos i mesures de protecció dels treballadors, ja que una roba no adequada a una atmosfera amb vapors de líquids inflamables, atmosferes ATEX, pot tenir una gran capacitat d'absorció dels vapors presents a l'ambient, i a més, carregar-se d'electricitat estàtica.^{9, 16}

4.5. EXEMPLES D'EXPLOSIONS UVCE

Durant l'estància en aquesta empresa es van estudiar alguns casos sobre explosions UVCE, ja investigats i determinats pels tècnics de la mateixa.

De tots aquests en destacaré dos casos singulars que em van cridar l'atenció per la seva peculiaritat i que, a més, són totalment oposats.

1) Incendi en empresa de distribució de productes químics.

Es tracta d'un incendi succeït al Febrer de l'any 2017 en una empresa de comercialització/distribució de productes químics per a sectors industrials com detergents i cosmètics, pintures i vernissos, tractament d'aigües i superfícies, química bàsica i farmàcia, tèxtil, arts gràfiques o plàstics, etc.

L'incendi va succeir en plena jornada laboral quan un operari estava realitzant un transvasament des d'un camió cisterna a un depòsit tipus GRG (Gran Recipient per a mercaderies a Granel).

El producte transvasat era un derivat de la acetona, concretament, la metil-etil-cetona, coneguda comercialment com MEK.

Aquests vapors són 2.41 vegades més pesats que l'aire, pel que poden estendre's arran del terra i arribar a una font d'ignició.



Figura 3. Imatge de l'explosió de l'incendi.

La causa de l'incendi s'estableix com una explosió de núvols de vapor no confinats, en el qual la font d'ignició va ser la presència de càrregues electro-estàtiques. Aquestes poden ser generades en el transvasament de líquids inflamables al entrar en contacte amb altres materials.

Si s'acumula la magnitud d'electricitat estàtica suficient es poden produir espurnes de descàrrega, que en presència d'una mescla de vapor-aire inflamable podrà tenir lloc una ignició.

A més, les càrregues electro-estàtiques també poden generar-se quan el tipus de roba no és l'adequat per a manipular certes mercaderies perilloses.

És sabut que l'empresa no havia facilitat a l'operari la roba adequada per a treballar en ambients amb atmosferes explosives, de manera que, tenint en compte que era febrer, es dedueix que anava vestit amb roba d'hivern, ja sigui roba confeccionada amb llana natural o artificial, amb fibres de polièster o cotó... teixits que presenten una alta possibilitat d'absorbir els vapors presents a l'ambient.

La primera explosió es va produir quan l'operari de l'empresa estava omplint uns GRG. L'incendi es propaga a gran velocitat perquè junt al GRG que s'estava omplint hi havia 10 dipòsits més que ja estaven plens de MEK. Aquests es van trencar violentament per la calor generada alliberant grans quantitats de vapors inflamables.

La calor i les flames van fer que s'originessin multitud d'explosions degudes a la presència de productes inflamables, que van exercir un efecte multiplicador.

2) Intent de suïcidi

Algunes deflagracions de gas són degudes a intents de suïcidi. Les persones que intenten suïcidar-se creuen que el GLP i el GNL són gasos tòxics.

Generalment, el que solen fer és tallar la goma conductora de la bombona de gas per a que el gas flueixi, amb el qual intenten suïcidar-se per asfixia. No obstant, no és cert ja que aquests gasos es poden inhalar en presència d'aire sense causar efectes negatius al cos, encara que no són respirables.

El que realment succeeix és que el gas provinent d'aquestes bombones domèstiques, normalment gas butà, és més dens que l'aire i es va acumulant i ascendint de baix a dalt, distribuïnt-se per tot el recinte, fins que es troba amb una font d'ignició i deflagra.

Aquestes poden ser diverses, ja que el gas amb la humitat es fa conductor i el contacte amb una presa de corrent, com podria ser una ràdio o una nevera, un endoll, etc., és suficient per a donar origen a la deflagració.



En la majoria de casos, aquestes deflagracions causen greus desperfectes materials així com també víctimes mortals.

La ignorància els porta a produir danys colaterals que ells no tenien intenció d'ocasionar.

Figura 4. Imatge recollida d'un dels sinistres per intent de suïcidi.

4.6. METODOLOGIA D'INVESTIGACIÓ D'INCENDIS I EXPLOSIONS

Tal i com es mostra a la Figura 5, tota metodologia d'investigació de la causa d'un sinistre de tals característiques comença amb una inspecció de l'escenari d'aquest, del qual se'n trauran unes conclusions del seu origen, propagació i causa, segons les marques de fum i calor.

Una vegada determinada la dinàmica i la causa de l'incendi es proposarà un model teòric que serà contrastat amb la realitat observada.

Per tant, s'ha de comprovar si la solució proposada és raonable. Si la coincidència és correcta, en funció de com es genera la font de calor que el desencadena, l'incendi es classificarà en natural, accidental o intencionat. Si la font de calor no es pot determinar, es qualificarà de desconegut. ^{3, 4, 12}

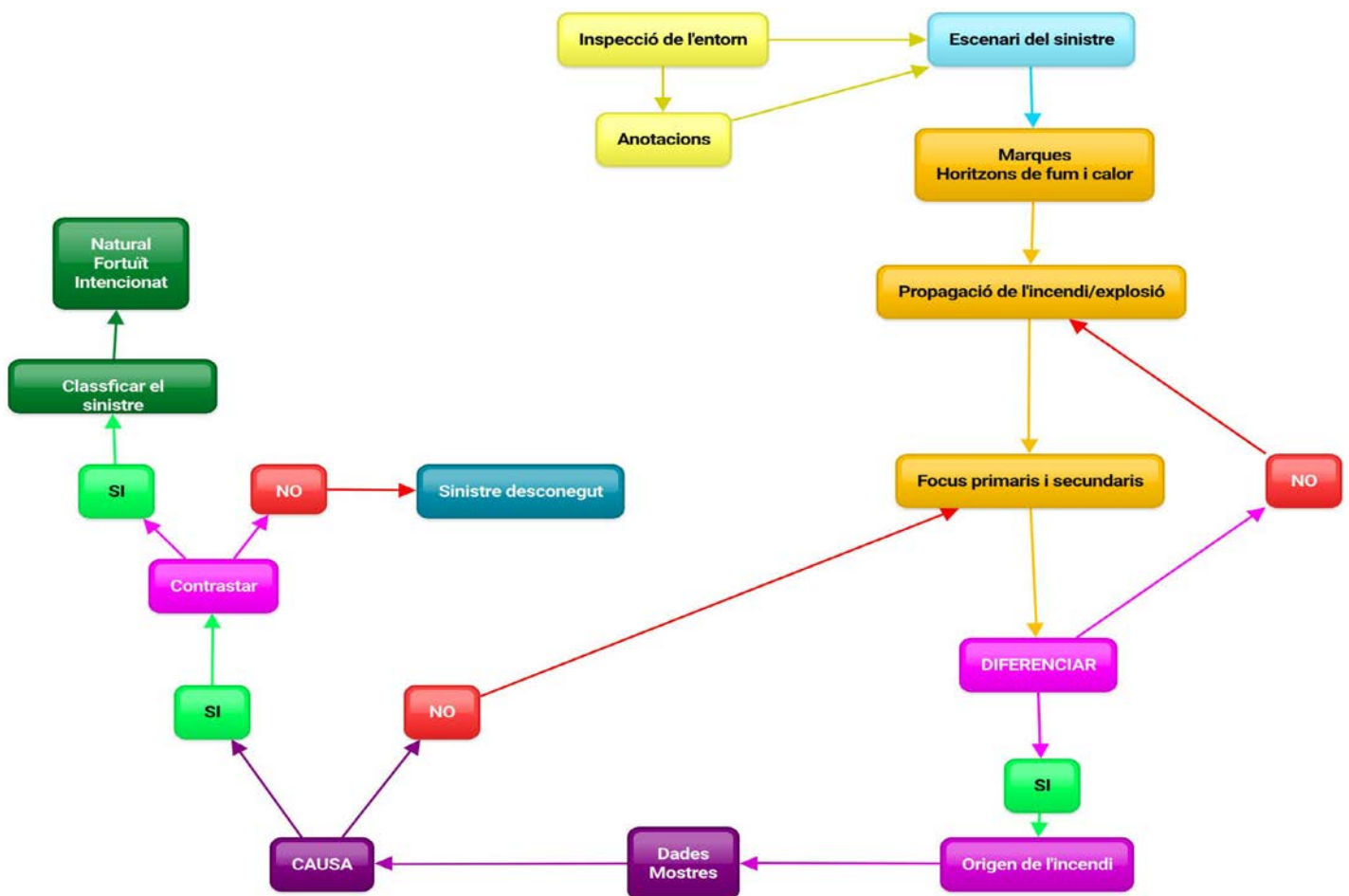


Figura 5. Esquema de la metodologia a seguir en una investigació d'incendis i/o explosions.

4.6.1. Mètodes d'identificació d'explosions UVCE

Particularment, en l'anàlisi d'explosions de núvols de vapor no confinats, entre les principals etapes a considerar destaquen: ¹⁹

- La descripció de l'escenari accidental: anàlisi i determinació del tipus de substància inflamable y/o combustible.
- La dispersió atmosfèrica: predicció de la dispersió del núvol de vapor inflamable a l'atmosfera.
- Estimació d'efectes i conseqüències: quantificació d'efectes i danys causats, que variaran en funció de la distància.

4.7. CASOS D'ESTUDI

Entre tots els sinistres succeïts i investigats durant el període que he estat present a l'empresa, en aquest apartat, s'explicaran els dos casos més rellevants d'acord al tema proposat, relacionats amb les explosions UVCE.

El motiu de la elecció d'aquests dos casos concrets per a ser explicitats en aquest treball, és la causa dels mateixos, relacionada amb les explosions UVCE.

Cas 1

Es realitza una investigació sobre un sinistre transcorregut el passat mes d'abril del 2018 sobre les 21:40 hores, amb l'objectiu de determinar l'origen i la causa de l'incendi en base a la inspecció ocular sobre l'escenari on succeeix el sinistre i les informacions facilitades.

- Descripció de l'empresa on succeeix el sinistre

El present incendi va tenir lloc a una nau industrial dedicada a la producció, manipulació i comercialització de raïm sense pinyol al sud-est d'Espanya.

Durant aquell període l'empresa no estava en producció donat que la campanya encara no ha començat, pel que l'activitat era mínima, únicament manteniment de les instal·lacions.

- Breu ressenya sobre el sinistre

L'incendi es va produir quan la jornada laboral ja havia finalitzat i, per tant, no es comptava amb la presència de treballadors.

Durant la tarda del dia de l'incendi es van realitzar les tasques de manteniment d'un dels robots del procés productiu i el pintat de sòls i pedestals per part d'una empresa externa contractada de pintura.

- Inspecció de camp. Escenari del sinistre

Personats al lloc del sinistre, el dia 10 d'abril de 2018, es va procedir a realitzar la preceptiva inspecció ocular.

En primer lloc, es va realitzar un examen perimetral de la zona afectada, en la qual es va poder apreciar que la zona on es va desenvolupar l'incendi és la zona de moll de càrrega i descàrrega de la nau, coincidint amb l'existència de restes de pots pintures, materials i dissolvents empleats per pintors d'una empresa externa de pintures. Observar-se a la Figura 6.



Figura 6. Moll de càrrega i descàrrega de la nau afectada (esquerra). Restes de pots de pintura, materials i dissolvents utilitzats pels pintors d'una empresa externa contractada.

Durant la segona visita, realitzada el dia 17 d'abril de 2018, es va examinar amb detall la zona en la que es va desenvolupar l'incendi localitzant-se restes calcinades a la part inferior dels pots de pintura i els estris, utilitzats per al pintat de la zona, afectats, Figura 7.



Figura 7. Restes calcinades, derivades de les substàncies utilitzades pels pintors.

Per una altra banda, comprovant les restes del sistema elèctric que es van trobar per la nau, es va localitzar un altre focus amb múltiples fusions i perles de coure on estava la línia de cable elèctric.

El dia 26 d'abril de 2018 es va dur a terme la tercera visita amb l'objectiu de comprovar les restes del sistema elèctric que alimenta la nau, degut a les múltiples fusions trobades la visita anterior.

Així la investigació es va centrar en el sostre del moll de recepció, on es van trobar les restes de cablejat amb fusions de coure conformades, Figura 8.



Figura 8. Algunes de les múltiples fusions trobades prop de l'origen del sinistre.

- Origen del sinistre

Acabada la inspecció de camp, es va procedir a determinar el lloc en el que va tenir origen el sinistre en base al comportament dels diferents materials i els vectors de propagació deixats pel mateix incendi.

Estudiant els vectors de propagació existents, es va establir que, al moll afectat, les lesions als tancaments verticals i les senyals de propagació de l'incendi indiquen que l'origen es situa a la zona posterior dreta conforme s'accedeix al moll, on s'ubica el material de pintura utilitzat per l'empresa de pintura, externament contractada, Figura 9.



Figura 9. Fotografia de la nau després del sinistre, on es poden observar els vectors de propagació que indiquen l'origen de l'incendi.

- Causa del sinistre. Dinàmica

Una vegada determinada la zona d'origen, es va procedir a determinar la causa que va originar el sinistre.

Per a això, es va realitzar una comprovació de les restes existents a la zona d'origen que s'ha mencionat anteriorment, i un posterior desenrunament, en el qual es va verificar la presència de restes de pots de diferents dissolvents.

Analitzades les restes de l'interior dels pots mitjançant consultes realitzades als operaris de la empresa de pintura externament contractada, es va establir que la formulació de la pintura (toluè, acetat de metoxipropil, diisobutilacetal, anhidrid maleic, anhidrid ftàlic i inhibidors de la corrosió, principalment) es realitza afegint certa quantitat de dissolvent, el qual és inflamable, ja que està compost a base de xilè, etilbenzè i hidrocarburs n-alcans.

Els límits inferior i superior d'inflamabilitat dels quals són 0.8% i 6.7%, respectivament.

Les densitats de vapor més significatives són:

<i>densitat del xilè</i>	→	<i>3.7 g/mL</i>
<i>densitat del toluè</i>	→	<i>3.2 g/mL</i>
<i>densitat de l'etilbenzè</i>	→	<i>3.7 g/mL</i>
<i>densitat del metoxipropil</i>	→	<i>4.6 g/mL</i>

S'observa també l'existència de múltiples fusions en les instal·lacions elèctriques de les proximitats de la zona d'origen.

Després de les comprovacions realitzades, tot apunta a que el sinistre va ser causat per una explosió d'un núvol de gas confinat d'un d'aquests dissolvents que utilitzaven els pintors. Aquest dissolvent no va ser tapat quan es va acabar d'utilitzar i al quedar exposat a l'atmosfera va formar un núvol de gas/vapor inflamable més dens que l'aire, motiu pel qual es va desplaçar pel terra fins a abastir la línia de cablejat elèctric, que actuaria de font d'ignició produint dit sinistre.

Conclusió: La causa de l'incendi és la formació d'un núvol de vapor no confinat al entrar en contacte amb un punt calent de la instal·lació elèctrica, sent les fusions trobades una conseqüència de l'incendi.

Cas 2

Es realitza un altra investigació d'un sinistre transcorregut el passat 7 de maig del 2018 sobre les 16:00 hores, amb l'objectiu de determinar l'origen i la causa de l'incendi en base a la inspecció ocular sobre l'escenari on succeeix el sinistre i les informacions facilitades.

- Descripció de l'empresa on succeeix el sinistre

L'empresa afectada pel present incendi és una fàbrica de resines i derivats de polièster per al seu ús en la construcció, principalment.

En aquest tipus d'indústries les conduccions han de ser netejades per a eliminar les restes de resines i derivats de polièster que queden adherides. Aquesta neteja es realitza fent passar acetona, un dissolvent amb gran poder de dilució, a través de les canonades i conductes. L'acetona queda contaminada, pel qual és sotmesa a un procés de purificació.

Dit procés es realitza a una màquina recuperadora, que bàsicament és un tanc on es posa l'acetona contaminada i es destil·la, situada sota un porxo de les immediacions de la nau central.

La màquina consta de dos recipients, en un dels quals es realitza l'operació de destil·lat mentre que l'altre procedeix al buidat dels residus contaminants que portava l'acetona, Figura 10.

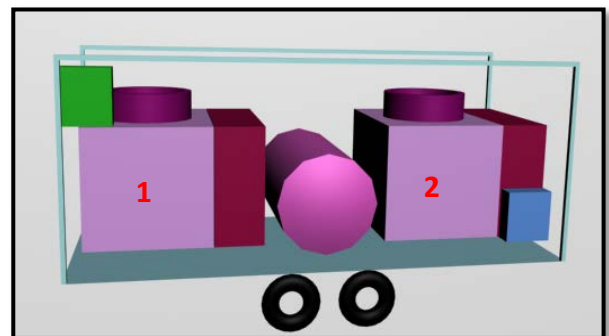


Figura 10. Esquema de la màquina destil·ladora.

- Breu ressenya sobre el sinistre

L'incendi es va produir en plena a jornada laboral.

Durant aquest dia es va posar en funcionament la màquina destil·ladora. Moment en el que es va originar, sobtadament, un fogonada que va destruir-la completament.

- Inspecció de camp. Escenari del sinistre

Personats al lloc de l'incendi els dies 9 i 11 de maig del present any, es va procedir a realitzar la inspecció ocular sobre l'escenari on el desenvolupa el sinistre.

La major afectació de l'incendi es destaca a l'entorn de la màquina destil·ladora, on es recupera l'acetona utilitzada en la neteja de conductes de la unitat de producció, Figura 11.



Figura 11. Entorn de la màquina destil·ladora d'acetona després d'haver-se produït el sinistre.

Realitzada a inspecció de camp, es determina que l'origen de l'incendi es situa als voltants de la màquina recuperadora de l'acetona, ja que, al inspeccionar l'entorn d'aquesta, s'aprecia que un dels recipients situat a 20 metres, indica un atac del foc a la seva cara orientada cap a la màquina destil·ladora. Observant-se una trajectòria idèntica als bidons situats al mateix porxo, Figura 12.



Figura 12. Vectors de propagació que indiquen l'origen de l'incendi.

- Causa del sinistre. Dinàmica

Determinat el lloc on va tenir origen l'incendi, el següent pas va ser trobar la font de calor que va li donar gènesi.

Al observar la màquina, es veu que al recipient de destil·lació, senyalat amb el número 1, s'aprecia una tonalitat vermellosa, corresponent a una oxidació humida. En canvi, al recipient senyalat amb el número 2, s'aprecia una tonalitat blavosa que indica oxidació completament seca, Figura 13.



Figura 13. Recipients de destil·lació de la màquina recuperadora d'acetona.

En un incendi de ràpida evolució en el qual un combustible presenta una combustió completa, al produir-se les primeres flames, l'oxigen de l'entorn es consumeix ràpidament, pel qual es produeix l'anomenada oxidació seca.

A mesura que evoluciona l'incendi, la combustió deixa de consumir tot l'oxigen i això provoca l'oxidació humida.

Totes les proves localitzades evidencien que durant el procés de recuperació va haver una formació de vapors d'acetona que es van desprendre de la pròpia màquina. Aquests són altament inflamables i amb densitats més elevades que la de l'aire, pel que es van propagar fins al quadre elèctric de la pròpia màquina, Figura 14.

densitat de vapor de l'acetona → *2.0 g/mL*

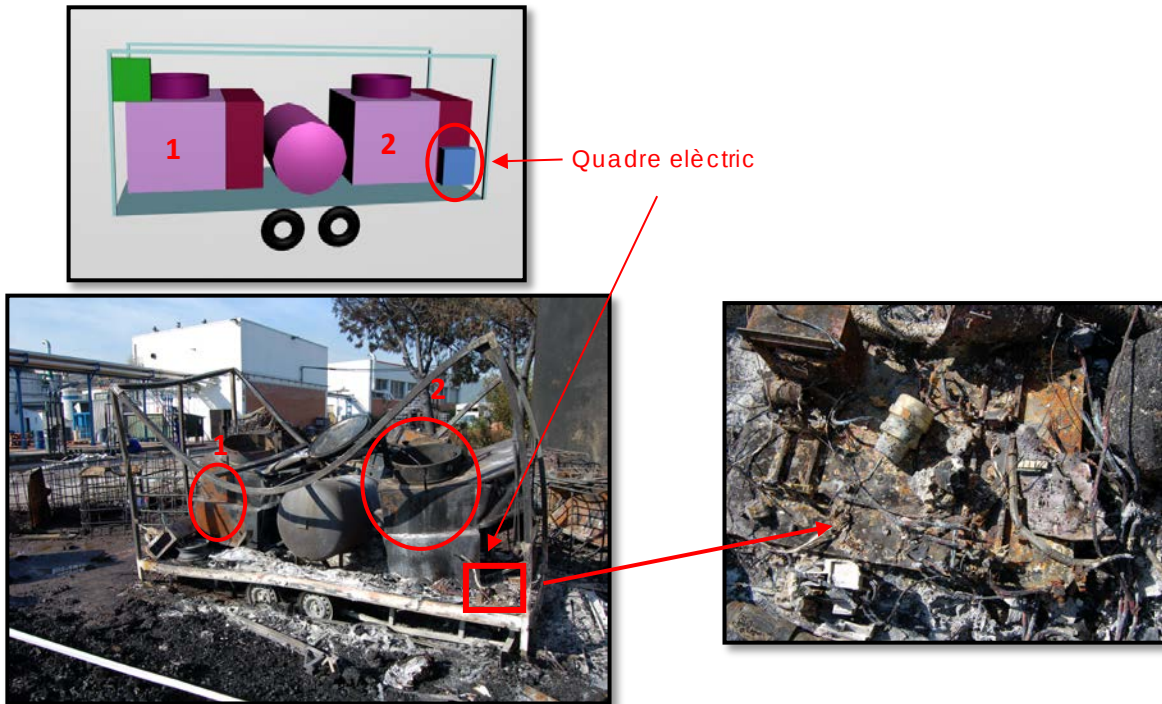


Figura 14. Quadre elèctric de la pròpia màquina destil·ladora que actua com a font d'ignició.

La calor dels propis conductes del quadre va generar una energia d'activació suficient com per a que prenguessin els vapors d'acetona inflamables.

Concloent: La causa de l'incendi va ser la formació d'un núvol de vapor no confinat al entrar en contacte amb el quadre elèctric de la pròpia màquina.

5. RESULTATS I DISCUSSIONS

La presencia de fusions en els conductors de coure no és un indicatiu de la causa del sinistre. Pot ser que més que la causa sigui la conseqüència. Aquest fet es determina mitjançant, com el que es coneixen, tècniques analítiques metal·logràfiques.

És sabut que la calor i les altes temperatures aplicades sobre els materials metàl·lics promouen o acceleren els processos oxidatius superficials del material, sempre i quan aquests es trobin en presència d'oxigen, el que s'anomena atmosfera favorablement oxidant.

Per altra banda, els efectes de l'aplicació directa de les flames sobre la superfície del conductor són els contraris degut a l'existència d'una atmosfera reductora a l'interior de les flames. En aquest cas, sobre la superfície del conductor es dona la reacció de reducció, contrària a l'anterior.

En ambdós casos el material es veu sotmès a elevades temperatures que ocasionen microestructures tant en superfície com al seu interior, assolint inclús la fusió del mateix. Aquests efectes són d'ordre macroscòpic, sent perceptibles a simple vista fusions, perlat, deformacions per fluència, oxidació o reducció de superfícies.

A nivell microestructural els efectes són visibles mitjançant diferents tècniques analítiques. En base al creixement de mida de gra i per mitjà dels diagrames de fases es poden establir, o al menys aproximar les temperatures que ha sofert el material, així com l'atmosfera a la que ha estat sotmès.

Els anàlisis metal·logràfics sobre conductors elèctrics de coure són les úniques analítiques que s'han portat a terme durant aquest període, amb la finalitat de determinar si les fusions observades al coure del cablejat i quadre elèctric són conseqüència o causa de l'incendi, és a dir, si estem en front d'una fallada elèctrica, o més bé es conseqüència de les temperatures assolides durant l'incendi. ^{21, 23}

Aquestes, de vegades es resolen amb el microscopi òptic. No obstant, quan són més complexes es realitzen amb microscòpia electrònica, els nostres específicament al departament d'Enginyeria de Materials de la Universitat Politècnica de Valencia.



Il·lustració 4. Microscopi òptic amb canvi de lent automàtic(dreta) i microscopi electrònic d'escombratge (esquerra).

Les dades obtingudes es reinterpreten sobre el diagrama de fases del coure, metall del qual estan formats els conductes elèctrics, Figura 15.

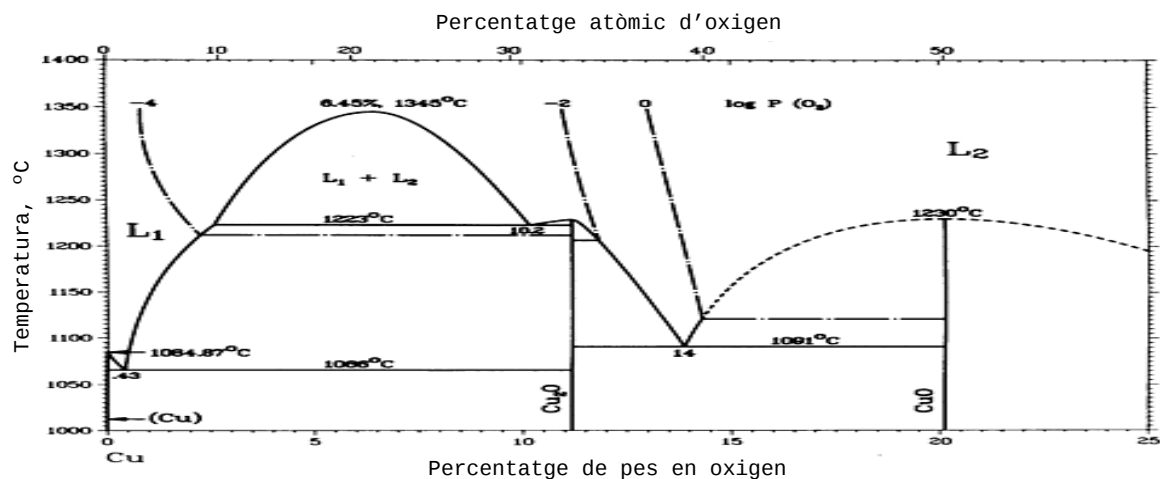


Figura 15. Diagrama de fases del coure

Tal i com s'observa al diagrama d'equilibri Cu-O, es representen les línies de transformació en funció de la temperatura per a cada composició del material. Així, el diagrama d'equilibri permet extreure les microestructures d'equilibri per a analitzar les estructures afectades i avaluar l'efecte que ha pogut produir la temperatura en la microestructura. A més poden produir-se fenòmens de difusió entre els elements constituents de l'aliatge que poden presentar fortes segregacions cap als bordes de les estructures cristal·lines o grans.²⁰

A la Figura 16 es mostra el creixement de gra a mesura que augmenta la temperatura.²²

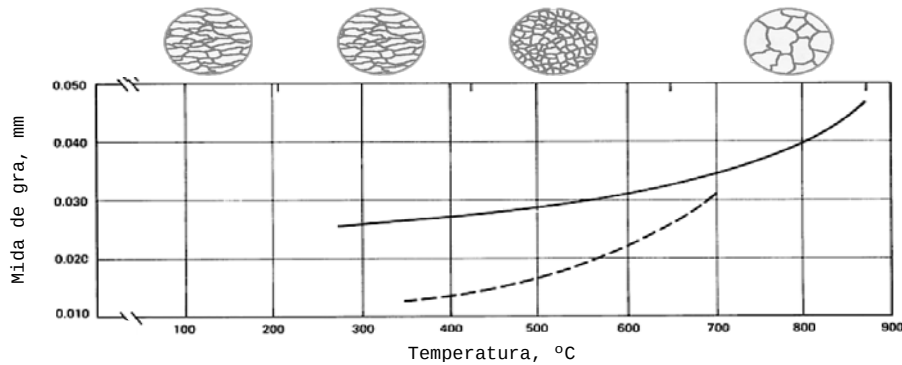


Figura 16. Evolució de la mida de gra del coure en funció de la temperatura.

La Figura 17 mostra la part del diagrama de Cu-O corresponent a la zona de màxima solubilitat, apreciant-se una disminució de la temperatura de fusió del coure de 1084 °C a la de l'eutèctic Cu-O de 1066°C. Aquesta solubilitat de l'oxigen a la matriu de coure, que presenta el seu màxim pròxim a 0.0075%, és indicatiu de la facilitat amb la que aquests dos elements donaran lloc a la transformació eutèctica que succeeix per a un percentatge en oxigen del % del coure.²⁰

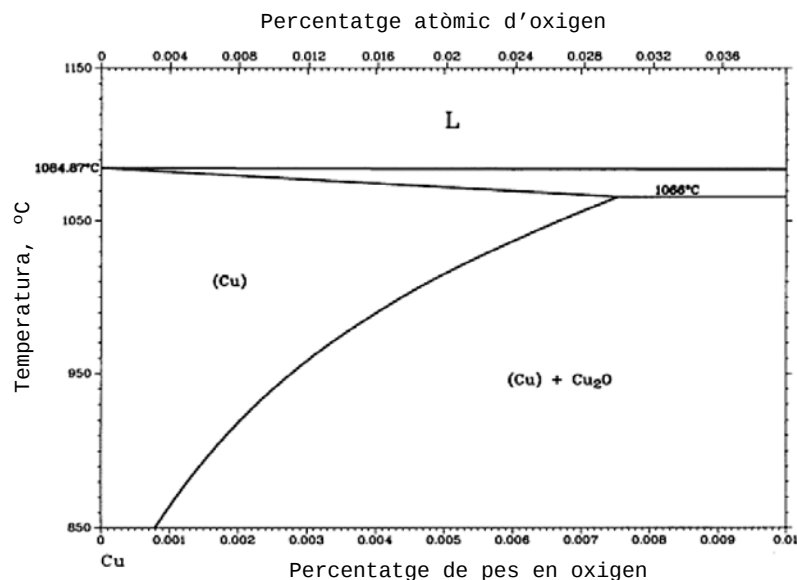


Figura 17. Zona de màxima solubilitat del diagrama d'equilibri Cu-O.

Així, en un curtcircuit primari no hi ha escalfament previ i per tant no hi ha absorció d'oxigen. A diferencia d'un curtcircuit secundari en el que hi ha un escalfament previ i ràpid que oxida la superfície i després curtcircuita, pel qual es refreda seguidament i el gra no creix per la fusió del material, però sí que inclou l'oxigen (oxidació), pel que es veu un eutèctic, Figura 18. ^{22, 23}

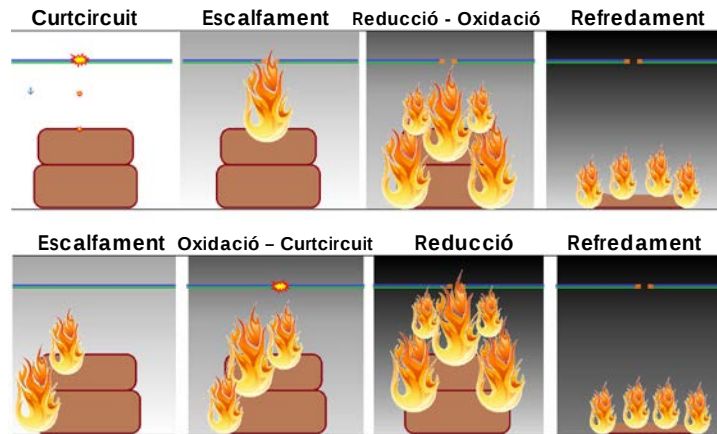


Figura 18. Seqüències de curtcircuit primari (imatge superior) i curtcircuit secundari (imatge inferior).

Els resultats dels anàlisis de les mostres de coure preses en ambdós sinistres estudiats més detalladament en aquest projecte s'exposen a continuació:

A la Figura 19, pertanyent a la mostra del cablejat elèctric del primer cas d'estudi, s'observa la formació d'un eutèctic a la vora de gra que reflexa una prèvia oxidació amb una posterior fusió del material a elevades temperatures, indicant la presència d'un curtcircuit de caràcter secundari, el que significa que les perles trobades són conseqüència de l'incendi.

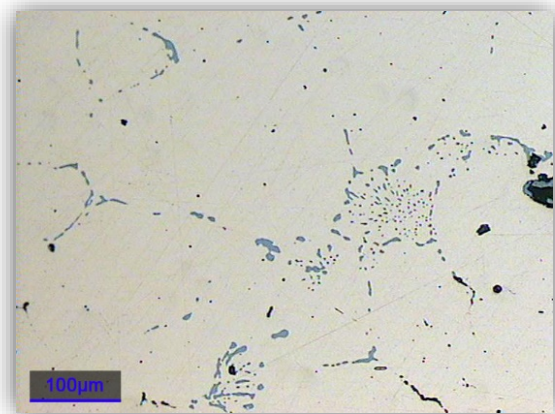


Figura 19. Mostra de coure del cablejat elèctric pertanyent al sinistre del primer cas d'estudi.

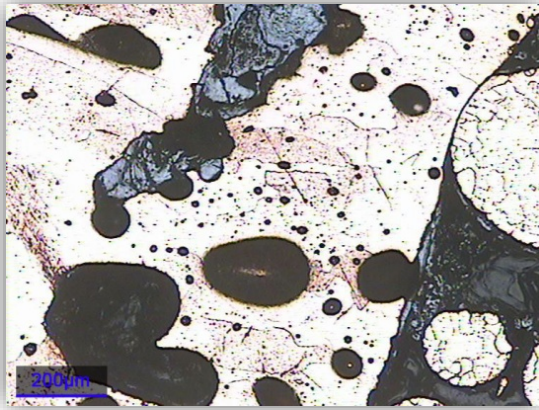


Figura 20. Mostra de coure del quadre elèctric pertanyent al sinistre del segon cas d'estudi.

La mostra de coure presa del quadre elèctric del segon cas d'estudi, Figura 20, presenta l'existència de fusions amb gran porositat característica d'arcs elèctrics i ràpida solidificació, amb inclusions d'òxids que revelen la prèvia existència d'una atmosfera oxidant, seqüència que representa un curtcircuit secundari, i per tant, conseqüència i no causa.

En resum: en les analítiques realitzades es confirma que la causa de l'incendi va ser, per als dos casos estudiats, una explosió de núvols de vapor no confinats amb cablejat elèctric com a font d'ignició o font de calor.

6. CONCLUSIONS

Consultada la bibliografia, realitzats els estudis i fetes les observacions sobre les explosions UVCE s'arriba a les conclusions següents:

- Les explosions UVCE són de difícil predicció, ja que les fuites poden ocasionar-se en moltes parts del procés.
- Aquestes explosions succeeixen més freqüentment durant el transvasament de líquids inflamables. Tant quan es realitza d'un camió a un dipòsit (descàrrega) com entre dipòsits.
- Els líquids inflamables que presenten major risc en donar gènesis a explosions UVCE són aquells, el vapor dels quals és més dens que l'aire.
- Els vapors més densos que l'aire poden estendre's pel terra i entrar en contacte en possibles fonts d'ignició que es troben a un punt distant.

Dit això, només queda afirmar que l'objecte dels dictàmens tècnic-forenses no és establir responsabilitats, competència que incumbeix únicament als tribunals ordinaris de justícia, sinó aclarir els fets en base a la informació recollida i a la inspecció de camp sobre l'escenari on succeeix el sinistre per a, finalment, mitjançant dades tècniques i doctrina científica, proposar un model acord amb la realitat de l'esdeveniment.

València, a 15 de juny del 2018.

Signat:

Karen Martí Torres

Graduada en Química

7. BIBLIOGRAFIA

- 1) **L. Carper, Kenneth L. i altres.** "*Forensic Engineering, Second Edition*". CRC Press LLC, 2000.
- 2) **Drysdale Dougal.** "*An introduction to fire dynamics, Second Edition*". John Willey & Sons, 2002.
- 3) **Noon, Randall.** "*Engineering analysis of fires and explosions*". CRC Press LLC, 1995.
- 4) **Almirall, José R. i Furton, Kenneth G.** "*Analysis and interpretation of fire scene evidence*". CRC Press LLC, 2004.
- 5) **Pons i Grau, Vicent.** "*Dinàmica del foc, Origen i causa dels incendis*". Edicions del Bullent, 2003.
- 6) **Pons i Grau, Vicent i altres.** "*Introducció a l'enginyeria forense*". Albatros Ediciones, 2016.
- 7) **Storch de Gracia, J. M^a. i García Martín, Tomás.** "*Seguridad industrial en plantas químicas y energética. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*". Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2008.
- 8) **Casal, Joaquim i altres.** "*Análisis del riesgo en instalaciones Industriales*". Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, S.L., 1999.
- 9) **Blasco, Alberto i altres.** "*Manual de protección contra incendios. Decimosexta Edición del National Fire Protection Association*". Editorial MAPFRE, S.A., 1986.
- 10) **Perry, Robert H. i altres.** "*Manual del Ingeniero Químico. Séptima edición. Volumen II.*" Editorial McGraw-Hill, 2001.
- 11) **Pérez Zavala, Germán y Rueda Jiménez, Rafael.** "*Seguridad contra incendios en los establecimientos Industriales*". Ediciones APTB, 2005.
- 12) **NFPA 921 (National Fire Protection Association).** "*Guía para la Investigación de Incendios y Explosiones. NFPA 921*". Edición 2008.
- 13) **Woodward, John Lowell.** "*Estimating the flammable mass of a vapor cloud*". Ediciones American Institute of Chemical Engineers, 1998.

- 14) **Center for Chemical Process Safety.** "*Guidelines for evaluating process plant buildings for external explosions and fires*". Ediciones American Institute of Chemical Engineers, 1996.
- 15) **Baker, W.E.** "*Explosion hazards and evaluation*". Ed. Elsevier, 1983.
- 16) **Bodurth, F.T.** "*Industrial explosion, prevention and protection*". Editorial McGraw-Hill, 1980.
- 17) **Lewis, B. i Elbe, G.** "*Combustion, Flames and Explosions of Gases. 3rd Edition*". Academic Press, Orlando, FL., 1981.
- 18) **NFPA.** "*LP-Gas Explosion. A causeStudy*". Ediciones NFPA, 1974.
- 19) **Yallop, H.P.** "*Explosion Investigation*". Ed. The forensic Science Society, 1980.
- 20) **ASM Handbook.** "*Alloy Phase Diagrams. Vol.3, pàgines. 752-753*". ASM International, 1992.
- 21) **Lasheras, José M^a. i Carrasquilla, Javier F.** "*Ciencia de materiales*". Editorial Donostiarra, S.A., 1991.
- 22) **Herrera, Óscar.** "*Estudio metalográfico de los efectos de arcos eléctricos primarios y secundarios sobre cableado de cobre en el interior de atmósferas. Aplicación a la investigación de incendios y comparación de resultados con incendios reales. Tesis Doctoral*". Universitat Politècnica de València, 2015.
- 23) **Amigó Borrás, Vicente i altres.** "*Fundamentos de Ciencia de los materiales. Tomo I*". Universitat Politècnica de València, 1999.

