Resum

El present projecte té com a finalitat estudiar la freqüència d'ocurrència d'accidents associats a Efecte Dòmino (ED en endavant) en instal·lacions d'emmagatzemament de substàncies inflamables i fer-ne l'anàlisi comparant els resultats amb els valors emprats actualment en la realització d'Anàlisis Quantitatives de Risc (AQR en endavant) definits per la Instrucció 14/2008 SIE "*Criteris per a la realització de les AQR a Catalunya"* (Generalitat de Catalunya, 2008).

En una primera fase es va limitar que l'anàlisi estudiaria únicament instal·lacions de GLP de dimensions mitjanes (un màxim de 4 tancs, fins a 100.000 kg), es van definir els accidents dels quals se n'estudiarien les freqüències i els criteris restrictius, hipòtesis respecte a les conseqüències de cada tipologia d'accident per tal de determinar la freqüència corresponent. A continuació es va definir l'algoritme per tal de calcular la propagació de la freqüència amb la que succeeix cada tipus d'accidents tenint en compte l'ED en instal·lacions amb diversos tancs d'emmagatzemament.

La segona fase de l'estudi consistia en definir el disseny d'experiments que es portarien a terme per tal d'obtenir un seguit d'arbres d'esdeveniments a la tipologia d'instal·lacions definida. Posteriorment es va portar a terme el tractament de dades i en va realitza l'anàlisi comparatiu dels valors de freqüència en casos amb ED obtinguts amb els valors proposats per la Instrucció anteriorment citada.

Els resultats que s'han obtingut demostren que els valors de freqüència de l'ED emprats actualment en la realització de les AQR no són suficientment precisos, arribant a donar-se diferències de més d'un ordre de magnitud, en el cas en què s'estudien accidents dels quals el succés iniciador és una pèrdua instantània del contingut del tanc d'emmagatzemament. Tot el contrari succeeix en els casos en què el succés iniciador és una pèrdua continuada del contingut, els resultats obtinguts indiquen que la metodologia proposada per la normativa actual dóna com a resultat valors de freqüència d'ocurrència per sobre dels determinats en el present estudi. Tanmateix, en aquest projecte, s'ha aconseguit determinar funcions gaussianes/potencials per tal de determinar les freqüències d'ocurrència dels diversos tipus d'Accidents Greus en funció de les característiques de la instal·lació.

Sumari

RESUM 1

SUMARI 3

1. PREFACI 7

1.1. Origen del projecte 7

1.2. Motivació 8

2. INTRODUCCIÓ 9

2.1. Objectius del projecte 9

2.2. Abast del projecte 10

3. REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA DELS PRINCIPALS MÈTODES D'ESTIMACIÓ DE LA FREQÜÈNCIA D'ACCIDENTS EN INSTAL·LACIONS INDUSTRIALS 11

3.1. Anàlisi històrica i estadística d'accidents 11

3.1.1. Principals accidents i catàstrofes amb GLP 12

3.2. Arbre de fallades 14

3.2.1. Definició 14

3.2.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica 15

3.3. Arbre d'esdeveniments 16

3.3.1. Definició 16

3.3.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica 16

3.4. Simulació de Monte Carlo 18

3.4.1. Anàlisi de la incertesa 18

3.4.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica 19

3.5. Anàlisi Markov 20

3.5.1. Definició 20

3.5.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica 21

3.5.3. Estat transitori o Diagrama de Markov 21

3.6. Anàlisi Bayesià 22

3.6.1. Definició 22

3.6.2. Aplicabilitat i solidesa 23

4. L'EFECTE DÒMINO EN L'ANÀLISI QUANTITATIVA DE RISC (AQR) 25

4.1. Definicions 25

4.2. Legislació i aplicació de l'AQR 25

4.3. L'efecte Dòmino a les AQR 25

5. METODOLOGIA _____ 27

5.1. Descripció de la metodologia 27

5.1.1. Dades entrants 29

5.1.2. Desenvolupament de les seqüències d'accidents 31

5.1.3. Valors llindar d'afectació 31

5.1.4. Càlcul de la freqüència final 33

6. APLICACIÓ DE LA METODOLOGIA. CASOS D'ESTUDI _____ 35

6.1. Enunciat 35

6.2. Resultats 37

6.3. Anàlisi de resultats 47

6.3.1. BLEVE 47

6.3.2. UVCE generada per una pèrdua instantània del inventari 49

6.3.3. *Flash Fire* generat per una pèrdua instantània del inventari 51

6.3.4. *Pool Fire* per a una pèrdua instantània del inventari 53

6.3.5. *Jet Fire* generat per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts 54

6.3.6. UVCE generada per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts 57

6.3.7. Flash Fire generat per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts 58

6.3.8. Pool Fire generat per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts 60

6.3.9. Jet Fire generat per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre 62

6.3.10. UVCE generada per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre 64

6.3.11. Flash Fire generat per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre 65

6.3.12. Pool Fire generat per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre 67

6.4. Conclusions 68

6.4.1. Conclusions referents a la metodologia emprada a l'AQR 68

6.4.2. Conclusions referents a l'anàlisi dels resultats obtinguts amb la metodologia dissenyada per al projecte 71

7. DETERMINACIÓ DE LA VARIACIÓ DE LA FREQÜÈNCIA EN FUNCIÓ DE LES VARIABLES DE DISSENY _____ 73

7.1. Procediment de l'estudi 73
7.2. Representacions gràfiques 74
7.2.1. BLEVE 75
7.2.2. UVCE - G.1 76
7.2.3. Flash Fire - G.1 77
7.2.4. Pool Fire - G.1 78
7.2.5. Jet Fire - G.2 79
7.2.6. UVCE - G.2 80
7.2.7. Flash Fire - G.2 81
7.2.8. Pool Fire - G.2 82
7.2.9. Jet Fire - G.3 83
7.2.10. UVCE - G.3 84
7.2.11. Flash Fire - G.3 85
7.2.12. Pool Fire - G.3 86
7.3. Equacions proposades 87
7.4. Model de validació. Anàlisi de residus 89
7.4.1. Gràfics dels Residus. Accidents G.1 90
7.4.2. Gràfics dels Residus. Accidents G.2 90
7.4.3. Gràfics dels Residus. Accidents G.3 91
7.5. Conclusions 93

IMPACTE AMBIENTAL 95

PRESSUPOST 97

CONCLUSIONS 99

AGRAÏMENTS 101

BIBLIOGRAFIA 103
Referències bibliogràfiques 103

1. Prefaci

L'estudi dels AG i en concret l'avaluació de l' ED en instal·lacions industrials és una doctrina que actualment està poc desenvolupada i a la que encara hi ha molts aspectes en els que aprofundir, degut principalment a la manca d'inversió en la recerca i la investigació. Tot i això durant anys, diversos autors com Valerio Cozzani o Ernesto Salzano entre d'altres han estudiat els AG i l'ED en processos industrials i n'han proposat noves metodologies per a l'avaluació d'aquests.

Donat que l'ED és un àmbit en el que s'ha d'aprofundir, és important remarcar que els criteris, l'heurística y les hipòtesis d'anàlisi que s'han fet servir en la realització del present estudi són els criteris que el personal involucrat en la realització d'aquest han cregut adients. Tot i això no són uns criteris universals i la selecció d'aquests no implica que altres autors obtinguin resultats desiguals amb els obtinguts en aquest projecte degut a una elecció de criteris diferents.

De la mateixa manera, és important remarcar que el present projecte no té com a principal finalitat establir una nova metodologia per a l'estimació de freqüències d'ED, si no avaluar la precisió dels mètodes usats a l'actualitat i, si és possible, obtenir correlacions que facilitin la determinació d'aquest paràmetre.

Tanmateix és necessari destacar que en aquest projecte s'han estudiat concretament instal·lacions d'emmagatzematge de GLP de dimensions mitjanes (fins a 4 tancs amb un màxim de 100.000 kg de producte) i que, per tant, els resultats obtinguts en el present estudi seran tan sols aplicables a aquest tipus d'instal·lacions.

En la determinació de freqüències no s'ha tingut en compte cap mena d'element reductor de la freqüència o salvaguarda.

1.1. Origen del projecte

El present projecte té el seu origen en el d'avaluar la robustesa de la metodologia d'estimació de freqüències de l'ED proposada en la normativa vigent a Catalunya per a la realització d'AQR.

1.2. Motivació

L'emmagatzematge de substàncies perilloses és un procés que té associat un elevat risc, i en el qual s'hi destinen molts recursos per a la planificació de mesures de seguretat. Tot i això, la seguretat s'hauria de tenir en compte a les etapes inicials del disseny d'aquest tipus d'instal·lacions, per tal d'optimitzar el nombre de tancs necessaris per emmagatzemar la quantitat desitjada. Els efectes i les conseqüències dels accidents greus són directament proporcionals a la quantitat de substància involucrada; per tant, si es divideix la massa en diverses unitats les conseqüències d'un accident serien menors. Contràriament, com més unitats es considerin per emmagatzemar una substància perillosa en una instal·lació, el risc d'efecte dominó augmenta

A més, l'efecte dòmino en instal·lacions industrials és un fenomen poc estudiat, però que pot tenir un impacte significatiu en el risc associat a un projecte. En el moment de realitzar l'anàlisi de risc relatiu a instal·lacions d'emmagatzematge de substàncies perilloses, el criteri utilitzat per comptabilitzar el impacte d'un possible efecte dòmino en el risc no ha estat estudiat detingudament, de manera que es planteja realitzar un estudi de l'efecte d'aquest fenomen en les freqüències d'accidents, per després obtenir correlacions que descriguin aquest paràmetre i poder comparar-los amb els valors i criteris utilitzats actualment en l'anàlisi de riscos.

2. Introducció

La normativa catalana obliga als establiments afectats per la legislació vigent en matèria d'AG a realitzar una AQR. Alhora de realitzar l'anàlisi de risc relatiu a instal·lacions d'emmagatzematge de substàncies perilloses, el criteri utilitzat per comptabilitzar a l'impacte d'un possible efecte dòmino en el risc no ha estat estudiat detingudament, de manera que es planteja realitzar un estudi de l'efecte d'aquest fenomen en les freqüències d'accidents, per després obtenir correlacions que descriguin aquest paràmetre i poder comparar-los amb els valors i criteris utilitzats actualment en l'anàlisi de riscos.

L'AQR és una metodologia usada per a definir el risc associat a instal·lacions estimant les conseqüències i freqüències de possibles accidents i s'utilitza aquesta informació per a dibuixar les corbes d'isorisc. L'AQR és una anàlisi àmpliament usada, tenint un impacte especial en la planificació del risc i la planificació de l'ús del sòl. A diversos països Europeus, la corba d'isorisc determina si una instal·lació és suficientment segura per a la població del seu entorn. El resultat de l'AQR pot arribar a determinar si una instal·lació existent és segura, si necessita ser modificar o si ha de cessar l'operació; o fins i tot determinar si la ubicació escollida per a una nova instal·lació és correcte o s'han de realitzar modificacions en el disseny.

L'efecte dòmino es defineix com una cadena d'esdeveniments per la qual les conseqüències de l'accident inicial es veuen incrementades tant a l'espai com temporalment, conduint a un accident molt més greu. Moltes AQR realitzades no tenen en compte l'ED en els escenaris ja que és un fenomen complex de modelar. Per tant, una eina de fàcil ús que incorporés l'ED als escenaris de les AQR seria molt útil per als enginyers que desenvolupen aquest tipus d'anàlisi.

2.1. Objectius del projecte

Els objectius principals del projecte són els següents:

- Calcular les freqüències d'ocurrència de possibles accidents per a instal·lacions d'emmagatzematge de GLP, tenint en compte la possibilitat que pugui produir-se un ED.

- Comparar els resultats obtinguts amb els valors de freqüència utilitzats actualment per a realitzar l'anàlisi quantitativa del risc en instal·lacions on pot donar-se l'ocurrència d'ED.

A més, i com a objectiu secundari, es procurarà:

- Obtenir equacions matemàtiques que descriguin els canvis a què estan subjectes les freqüències depenent de les variables de disseny.

2.2. Abast del projecte

El projecte es restringeix a:

- Estudi, a partir de l'elaboració de nombrosos arbres d'esdeveniments, de la freqüència d'ocurrència d'Accidents Greus ens instal·lacions amb les característiques definides al punt 2.

- Anàlisi i comparació dels valors obtinguts amb els emprats a les AQR fetes sota els criteris establerts a la normativa catalana per a la realització de les mateixes.

- Obtenció de correlacions fàcilment usables per al càlcul de freqüències.

Per tant, queden fora de l'abast del projecte els següents apartats:

- Estudi de freqüències d'ocurrència amb característiques diferent a les següents:

  - Capacitat d'emmagatzematge reduïda o mitjana (inferior a 100.000 kg).
  - Instal·lacions que no emmagatzemin GLP si no que emmagatzemin altre tipus de substàncies (productes tòxics, etc.).
  - Instal·lacions d'emmagatzematge de GLP disposades a l'interior de construccions.

- Comparació dels valors obtinguts amb valors teòrics d'aplicar els criteris establerts per altres normatives diferents a la normativa que regeix la Comunitat Autònoma de Catalunya.

3. Revisió bibliogràfica dels principals mètodes d'estimació de la freqüència d'accidents en instal·lacions industrials

3.1. Anàlisi històrica i estadística d'accidents

En el darrer segle, la tecnologia va experimentar molts i importants avenços suposant, aleshores, l'evolució de la industria química, donant lloc a un ampli ventall de productes químics presents a les instal·lacions i als mitjans de transport. Aquest fet ha provocat un augment de la probabilitat que es donin Accidents Greus amb impacte sobre les persones i altres bens.

Darrerament s'ha portat a terme un anàlisi històric de 5.325 accidents ocorreguts a la industria química i en el transport de mercaderies perilloses des de principis de segle fins a juliol de 1992. Com a dada significativa, cal remarcar que en els darrers 30 anys s'han reportat un 95% més d'accidents que en el període anterior.

La informació referent a l'activitat i tipus d'instal·lació en les quals es van produir els accidents queda reflectida a la següent taula 3.1.

Activitat	Nº de registres	Percentatge
Transport	2.341	39,1
Plantes de processament	1.469	24,5
Plantes d'emmagatzematge	1.044	17,4
Càrrega/Descàrrega	494	8,2
Domèstic/Comercial	348	5,8
Altres	296	5,0

Taula 3.1.a. Activitat on es van produir els accidents.

A la taula 3.1.a es pot observar que els accidents succeïts en plantes d'emmagatzematge ocupen el tercer lloc en nombre de vegades esdevinguts. Donat que en aquest estudi es tracten els accidents en plantes d'emmagatzematge, a la següent taula podem veure una anàlisi amb més detall d'aquest grup.

Tipus d'instal·lació	Nº de registres	Percentatge
Recipients a pressió atmosfèrica	499	47,9
Contenidors mòbils	177	16,9
Recipients a pressió	138	13,2
Canonades	49	4,7
Emmagatzematge de sòlids	23	2,2
Altres	158	15,1

Taula 3.1.b. Accidents segons el tipus d'instal·lació en plantes d'emmagatzematge

La informació mostrada en estudis del tipus del qual s'han extret les taules 3.1.a i 3.1.b han posat de manifest la necessitat de millorar la seguretat a les plantes industrials i de reduir el risc i probabilitats d'AG.

3.1.1. Principals accidents i catàstrofes amb GLP

Al llarg de la història han succeït diversos esdeveniments dels quals les conseqüències s'han considerat com a catastròfiques. Aquestes catàstrofes, generalment són conseqüència d'explosions, incendis o núvols tòxics que generats a la industria per motius varis.

A continuació es mostra un breu resum sobre les principals catàstrofes a la industria dels darrers 50 anys. succeïdes de diferents ubicacions d'arreu del món relacionades amb l'emmagatzematge de GLP.

Any	Lloc	Definició	Conseqüències
1964	Feyzen, França	Incendi de propà i posterior BLEVE de l'esfera (1.200 m^3) i explosió d'una segona (2.000 m^3)	17 morts i 84 ferits. Danys materials importants a un radi de més de 10 km.
1978	Catalunya, Espanya	BLEVE a partir del trencament d'una cisterna de propilè.	243 morts i més de 300 ferits. Destrucció del 70% del càmping "Els Alfacs" i l'entorn.
1980	Wealdstone, Anglaterra	Explosió d'un tanc de GLP i posterior incendi	1 mort i 12 ferits
1983	Nil, Egipte	Explosió d'un medi de transport carregat amb GLP	317 morts i 44 ferits.
1984	S. Juan Ixhuatepec, Mèxic	Nombroses explosions de dipòsits de GLP i posterior UVCE de GLP	Més de 500 morts, 4.500 ferits i 1.000 desapareguts Destrucció massiva d'habitatges
1992	Guadalajara, Mèxic	18 explosions de gas	Més de 200 morts i 100 ferits. Pèrdues materials taxades en 5.000 milions €.
2004	Skikda, Algèria	Explosió a la planta de GLP de Skikda	27 morts i 72 ferits. Danys importants en el 50% de les unitats de la planta.

Taula 3.2. Exemples de catàstrofes històriques amb GLP com a matèria involucrada.

3.2. Arbre de fallades

3.2.1. Definició

En l'anàlisi de risc és molt profitós determinar la probabilitat d'ocurrència d'un esdeveniment concret, les condicions de les quals depèn aquesta esdeveniment i els factors que poden influenciar la seva probabilitat. Una de les tècniques d'anàlisi per a determinar aquesta informació és la tècnica de l'arbre de fallades.

L'anàlisi de l'arbre de fallades és una anàlisi deductiu de fallades que es centra en un esdeveniment no desitjat en particular i en proporciona un mètode per a determinar les possibles causes d'aquest. L'esdeveniment no desitjat constitueix el punt de partida del diagrama construït, i generalment consisteix en una fallada total o catastròfica del sistema que s'està considerant.

L'arbre d'esdeveniments en si és un model gràfic de vàries combinacions seqüencials i paral·leles de fallades que resultaran en la probabilitat d'ocurrència de l'esdeveniment no desitjat. Les fallades poden estar associades amb fallades de sistemes, errors humans o qualsevol altre esdeveniment que pugui contribuir a l'esdeveniment no desitjat.

És important tenir present que l'arbre de fallades no és un model que te presents tots el possibles errors i les possibles causes de fallada d'un sistema. L'arbre d'esdeveniments s'adapta en funció de l'esdeveniment no desitjat, que correspon a un mode de fallada en particular i, per tant, l'arbre tan sols inclou aquelles fallades que contribueixen a la probabilitat de l'esdeveniment.

També és necessari destacar que l'arbre d'esdeveniments no és un model quantitatiu, és un model qualitatiu que pot ser avaluat quantitativament. Els resultats qualitatius generats per un arbre de fallades són els conjunts mínims. Es defineix com a conjunt mínim a la menor combinació d'esdeveniment bàsics que, si ocorren, causaran l'esdeveniment no desitjat. S'anomena a un conjunt mínim de primer ordre a aquell format per un únic esdeveniment bàsic, de manera que si tan sols que es doni aquest, causaria l'esdeveniment no desitjat, i s'anomena conjunt mínim de segon ordre a aquell format per dos esdeveniments bàsics que, si ocorren els dos, causaran l'esdeveniment no desitjat.

Un arbre de fallades és un entramat d'entitats anomenades "portes" que serveixen per permetre o bloquejar l'accés d'una fallada fins a la següent porta mostrant les relacions dels esdeveniments necessaris per a l'ocurrència d'un esdeveniment superior.

El nivell inferior d'un arbre de fallades està format per els anomenats esdeveniments bàsics o primaris. Aquests són esdeveniments dels quals se'n pot determinar o estimar la probabilitat d'ocurrència.

3.2.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica

L'anàlisi amb arbre de fallades és una important eina qualitativa que permet identificar totes les combinacions de fallades en l'equipament, errors humans, etc. que poden desencadenar una conseqüència no desitjada. Això permet focalitzar-se en prendre mesures preventives dels esdeveniments bàsics i reduir, així, la probabilitat d'ocurrència.

Les principals limitacions de la tècnica són:

- Es basa en la hipòtesis que els esdeveniments no desitjats rellevants han estat identificats.

- La hipòtesi que els factors contribuents han estat adequadament identificats i s'han analitzat amb suficient profunditat.

Tot i això, la tècnica de l'arbre de fallades és una tècnica universal utilitzada en qualsevol tipus de sistema i considerada com un de les anàlisis més profundes que prevalen.

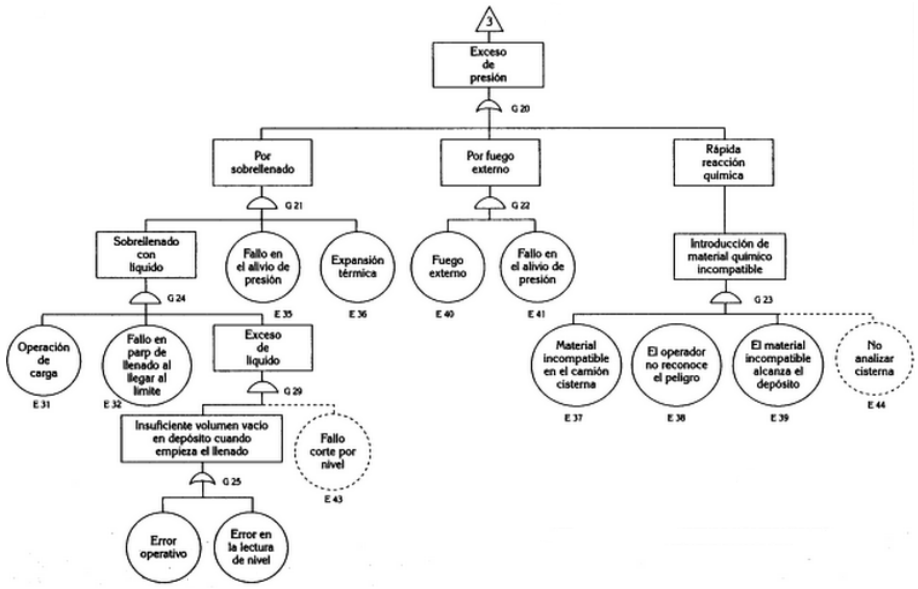


Figura 3.1. Exemple d'arbre de fallades

3.3. Arbre d'esdeveniments

3.3.1. Definició

Els arbres d'esdeveniments permeten estudiar o modelar seqüències d'esdeveniments que poden finalitzar amb conseqüències diferents. El punt de partida de la seqüència d'esdeveniments s'anomena succés iniciador, i en funció de la ocurrència de un o més esdeveniments intermedis pot donar-se un resultat o un altre. En un arbre d'esdeveniments s'han d'estudiar tots els possibles resultats que siguin de rellevància per al context de l'estudi a realitzar.

L'objectiu d'un arbre d'esdeveniments és proporcionar dades referents a les possibles conseqüències d'un succés iniciador, mentre que si recordem de l'apartat anterior, l'objectiu d'un arbre de fallades és clarificar com es pot desenvolupar un esdeveniment concret a partir de successos bàsics.

En el context d'aquest projecte, concretament, per a sistemes estacionaris com un emmagatzemament, és d'interès l'ús dels arbres d'esdeveniments per a l'anàlisi de sistemes de seguretat orientats a modelar seqüències d'accidents com a conseqüència d'una fallada en l'equipament o mala praxis en el procés. Quan se'n fa aquest ús, l'anàlisi d'arbres d'esdeveniments és un procés inductiu que l'analista inicia a partir d'un succés iniciador i desenvolupa les possibles conseqüències que puguin dur a terme accidents potencials..

Realitzar un arbre d'esdeveniments és molt útil en dues situacions:

- Quan un esdeveniment concret pot provocar més d'un resultat.

- Quan és d'interès estudiar la probabilitat d'ocurrència de cada un dels diferents resultats.

3.3.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica

Aquesta tècnica és aplicable universalment a tot tipus de sistemes, però s'ha de tenir en compte que s'han de preveure els esdeveniments no desitjats per tal d'obtenir resultats analítics significatius. L'anàlisi d'arbre d'esdeveniments és una tècnica molt utilitzada i amb un gran ventall d'aplicacions en l'anàlisi de riscs tant per a la industria química com per la nuclear, ja que l'anàlisi d'un arbre d'esdeveniments, normalment, és suficient per estimar la seguretat del sistema.

Pel que fa a la solidesa de la tècnica, aquesta, únicament té dues limitacions:

- El supòsit que s'han de preveure totes les conseqüències del sistema.

- Totes les conseqüències del sistema han de ser analitzades.

A continuació es mostra un exemple d'arbre d'esdeveniments:

L'exemple té com a objectiu analitzar les conseqüències d'una fuita continua d'un producte inflamable (GLP) en un tanc d'emmagatzematge pressuritzat.

Les anàlisis HAZOP (HAZard & OPerability) indiquen que com a possible conseqüència s'ha de considerar la BLEVE del tanc si la fuita troba un punt d'ignició, de no ser així, el núvol format s'escamparà i s'allunyarà del tanc. Si en l'avenç del núvol, aquest troba un punt d'ignició provocarà l'explosió del núvol, UVCE, o provocarà un FLASH transcorregut cert temps.

L'arbre d'esdeveniments corresponent al succés iniciador descrit és el següent:

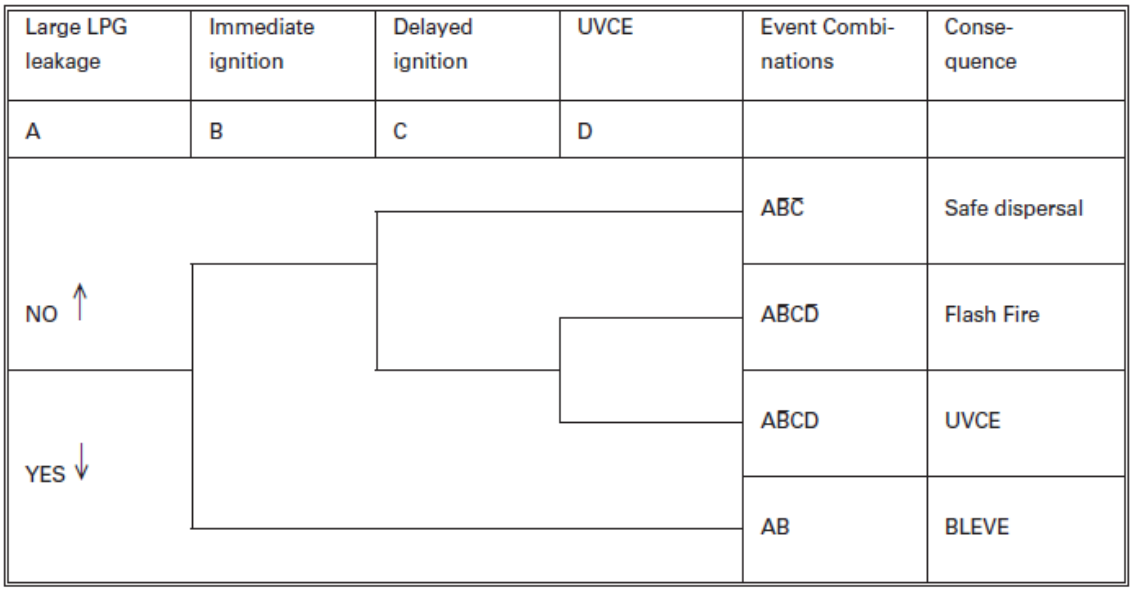


Figura 3.2. Arbre d'esdeveniments d'una fuita de GLP d'un tanc pressuritzat.

Com es pot observar hi ha un total de 4 esdeveniments intermedis:

A. Fuita continuada de GLP del tanc (succés iniciador)

B. Ignició immediata

C. Ignició retardada

D. UVCE

i un total de 4 possibles conseqüències:

1. BLEVE

2. UVCE.

3. Flash fire

4. Dispersió segura.

Així doncs, la probabilitat d'ocurrència de cada una de les diferents conseqüències es pot calcular seguint les relacions següents:

P(dispersió segura) = P(A) * (1 - P(B)) * (1 - P(C))

P(Flash fire) = P(A) * (1 - P(B)) * P(C) * (1 - P(D))

P(UVCE) = P(A) * (1 - P(B)) * P(C) * P(D)

P(BLEVE) = P(A) * P(B)

Aquestes probabilitats generalment es poden trobar en diverses referències bibliogràfiques, però en qualsevol cas, es poden determinar mitjançant la realització d'un arbre de fallades.

3.4. Simulació de Monte Carlo

3.4.1. Anàlisi de la incertesa

Atès que els models de risc i fiabilitat intenten simular la realitat, és inevitable que es realitzin hipòtesis que simplifiquin i idealitzacions dels processos i fenòmens. Aquestes simplificacions generen incerteses. Un dels tres tipus d'incerteses que es poden distingir són les incerteses en els paràmetres d'entrada del model.

Els paràmetres usats en les anàlisis de risc no són exactes degut a l'escassetat de dades, la variabilitat entre diferents plantes, etc. Per tant, és necessari realitzar una anàlisi de

sensibilitat. En aquestes anàlisis es modifica el valor d'un dels paràmetres d'entrada del model i s'analitza l'efecte d'aquesta desviació en la resta de paràmetres, en l'àmbit d'aquest projecte, s'analitzaria l'impacte sobre la freqüència de l'esdeveniment. Lògicament, el nou valor del paràmetre d'entrada ha de ser un valor lògic, comprès dintre d'un interval de valors estimats.

Aquesta anàlisi es realitzaria *n* vegades, modificant el valor del paràmetre d'entrada en cada un d'elles, per als diferents paràmetres incerts, aconseguint expressar la freqüència de l'esdeveniment no desitjat com una funció de distribucions d'incertesa dels paràmetres. Quan un esdeveniment es descriu millor amb una distribució de probabilitats que amb un únic valor, és recomanable obtenir una distribució de probabilitats de l'esdeveniment final. Aquest fet, és una tasca molt laboriosa que a vegades resulta impossible de fer analíticament. La tècnica de Monte Carlo aplica valors aleatoris per a la probabilitat de l'esdeveniment bàsic per tal de determinar la probabilitat de l'esdeveniment final. Repetint aquest procés molts cops, s'aconsegueix una distribució de probabilitats de l'esdeveniment final.

El mètode més àmpliament utilitzat per a propagar incerteses és la simulació de Monte Carlo. El procés de determinar la freqüència d'un esdeveniment no desitjat o la distribució característica d'un sistema com a funció de les distribucions dels paràmetres individuals s'anomena propagació de la incertesa.

En cada repetició de l'avaluació s'obtindrà un valor del resultat d'interès, com pot ser la freqüència d'ocurrència. El conjunt d'explotacions realitzades permetrà obtenir un conjunt de resultats a partir del qual es determinarà un valor mig de la probabilitat de l'esdeveniment final i la seva distribució d'incertesa.

3.4.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica

La tècnica de la simulació de Monte Carlo és un mètode relativament senzill per modelar sistemes complexes. Els algoritmes d'entrada són senzills d'entendre i a més, no existeixen restriccions pel que fa a la naturalesa de les hipòtesis de paràmetres tals com taxes de fallada o de reparació, de manera que es poden usar valors no constants.

El problema principal de la tècnica de la Simulació de Monte Carlo requereix la construcció d'un model probabilístic del sistema i transportar-lo a un computador, l'estimació de les distribucions de probabilitat dels paràmetres d'entrada i requereix que s'hauran d'interpretar les distribucions de probabilitats obtingudes. Tot això implica certa quantitat de temps i

requereix de diversos tipus d'habilitats i coneixements. Per aquest motiu és aconsellable que s'usi la tècnica de Monte Carlo tan sols en els casos en què els mètodes analítics hagin errat.

El fet d'incorporar un model de simulació a un computador facilita que gairebé tots els aspectes necessaris puguin ser incorporats al model probabilístic. A més, els resultats obtinguts són molt realistes i amb un grau d'error realment petit.

3.5. Anàlisi Markov

3.5.1. Definició

L'aproximació de Markov és pot aplicar al comportament aleatori dels sistemes que varien discreta o contínuament respecte el temps i l'espai. La variació aleatòria discreta o continua és coneix com a procés estocàstic. L'anàlisi Markov és un mode concret de procés estocàstic.

S'anomena procés Markov a un procés estocàstic si la distribució de probabilitat del progrés en el procés es determina exclusivament per l'estat actual, de manera que l'històric no té cap mena d'influència. Com a resultat d'aquesta característica, un component del sistema que ha patit una averia i ja ha sigut reparat es considera igual de bo com si fos nou i no hagués patit cap averia pel que s'assumeix que la taxa de fallada component és independent de la seqüència de fallades del component.

Tot i que s'utilitza el procés Markov en sistemes discrets i continus, en les properes pàgines tan sols considerarem sistemes binaris, per tant, els components únicament podran estar en funcionament o avariats. En referència als sistemes binaris, es distingeixen dos tipus de models Markov:

El procés Markov és molt útil per abordar diferents estratègies de manteniment, així com per a calcular la probabilitat de fallada demandada per un sistema de seguretat.

Un problema principal de l'anàlisi Markov és que el nombre d'estats del sistema s'incrementa molt ràpidament quants més components afegim al sistema. Una possible solució a aquest problema és realitzar primer una anàlisi mitjançant arbres de fallades, però seguir aquest camí té com a desavantatge que la interpretació de resultats és més complicada que si únicament realitzem els arbres de fallades. Un altre solució al problema és no utilitzar l'anàlisi Markov i utilitzar la tècnica de la simulació de Monte Carlo.

3.5.2. Aplicabilitat i solidesa de la tècnica

El cas en què l'anàlisi Markov és més beneficiósa per analitzar un sistema és quan la seqüència de fallades és important o quan la reparació d'aquestes es realitzar sobre una base continua.

L'anàlisi Markov és una de les tècniques d'anàlisi quantitativa més avançades en anàlisis de risc i fiabilitat. És una eina molt potent com a suport en l'anàlisi de fiabilitat, especialment en el cas en què s'estudien diverses estratègies de reparació

La limitació principal d'aquesta tècnica és que s'ha de tenir molta cura alhora d'eliminar possibles esdeveniments dependents.

3.5.3. Estat transitori o Diagrama de Markov

L'anàlisi Markov fa ús d'un diagrama de transició entre estats en el que es representen tots els estats rellevants en què el sistema es pot trobar. Un sistema pot trobar-se en diversos estats, un estat determinat per a cada combinació de fallada o funcionament normal de tots els components del sistema, el que implica que el sistema passa d'un estat a un altre si un component falla. El diagrama de transició d'estats modela el comportament del sistema en relació al correcte funcionament o la fallada de diversos components del sistema respecte el temps.

La generació d'aquest tipus de diagrames és una de les parts més importants de l'anàlisi Markov. És per això que tots els estats rellevants en els quals el sistema es pot trobar haurien d'incloure's en així com totes les vies possibles de transició entre estats.

És important mencionar que la tècnica de l'anàlisi Markov exclou la possibilitat que diversos estats coincideixin en l'espai-temps, de manera que, donat un temps *t*, únicament un estat podrà governar el sistema.

A continuació es mostra un exemple molt senzill que descriu un sistema que pot tenir 4 estats i que pot donar-se les transicions següents:

- De l'estat 1 a l'estat 3

- De l'estat 2 a l'estat 3

- De l'estat 3 a l'estat 4

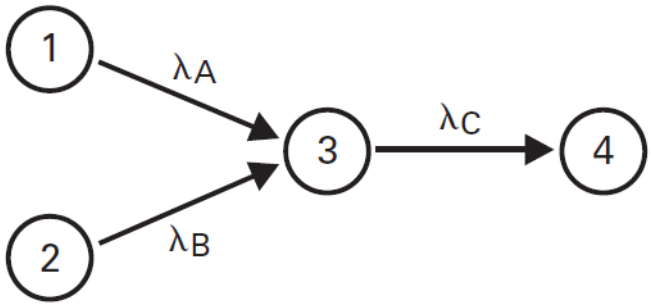


Figura 3.4. Exemple de Diagrama Markov

Suposem que en l'instant *t*, el sistema es troba en l'estat 3. Les restriccions de l'anàlisi Markov impliquen que la probabilitat de transició de l'estat 3 a l'estat 4 en un interval de temps Δt és: $\lambda c \cdot \Delta t$.

La probabilitat que el sistema passi de l'estat 3 a l'estat 4 en un interval de temps Δt es pot calcular amb la següent formula:

$$P_{3\to4}(\Delta t) = P_c(t) \cdot \lambda_c \cdot \Delta t$$

3.6. Anàlisi Bayesià

3.6.1. Definició

L'objectiu de l'anàlisi Bayesià és combinar dades genèriques amb dades específiques del sistema de tal manera que la influència de les dades específiques en les dades combinades augmenti a mesura que es prologa el període de recollida de dades o el augmenti el nombre de fallades.

S'anomena a la informació genèrica "coneixement previ" a les dades del sistema concret. Aquest coneixement és una distribució d'incertesa respecte els possibles valors del paràmetres de fallada del component: λ o p. L'anàlisi Bayesià transforma la distribució d'incertesa en una distribució "posterior" incorporant dades específiques del sistema. Tant la mitja de la distribució com les seves cues (la incertesa) poden canviar durant el procés, com es pot veure a la figura següent:

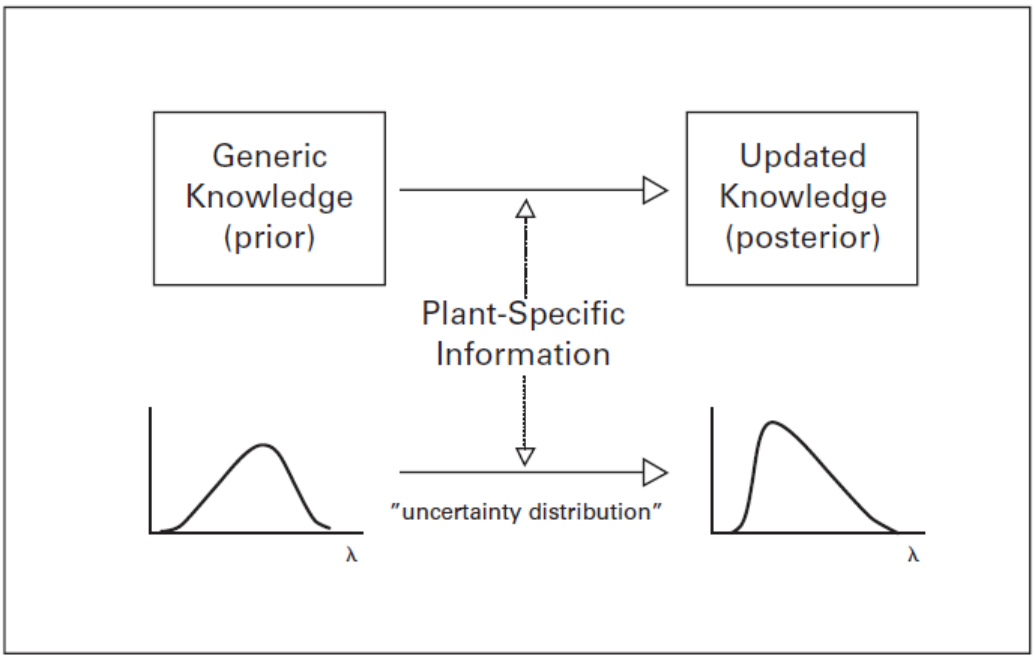


Figura 3.6.a. Objectiu de l'anàlisi Bayesià

L'anàlisi Bayesià consta dels següents passos:

- Obtenir dades de les distribucions genèriques (taxa de fallada i factor d'error) i dades específiques del sistema (nombre de fallades i durada) per a cada grup d'esdeveniments bàsics.

- Calcular per a cada dada una nova taxa de fallada i factor d'error per a cada grup d'esdeveniments bàsics.

3.6.2. Aplicabilitat i solidesa

L'anàlisi bayesià és un mètode especialment útil si hi ha poques dades disponibles del sistema a analitzar o si es té molt poca confiança en les dades existents. És important mencionar que si es disposa d'un gran registre de dades de fallades del sistema en concret, l'aplicació de l'anàlisi Bayesià és aproximadament obté, aproximadament, el mateix resultat que les tècniques d'estimació estadística.

Un cop ja es disposa de la distribució posterior (la distribució genèrica actualitzada mitjançant les dades específiques del sistema o component), de manera que les ja es pot utilitzar en la determinació de freqüències.

A continuació es mostra una figura en la qual es veuen representades les dues distribucions que representen la taxa de fallada d'una bomba.

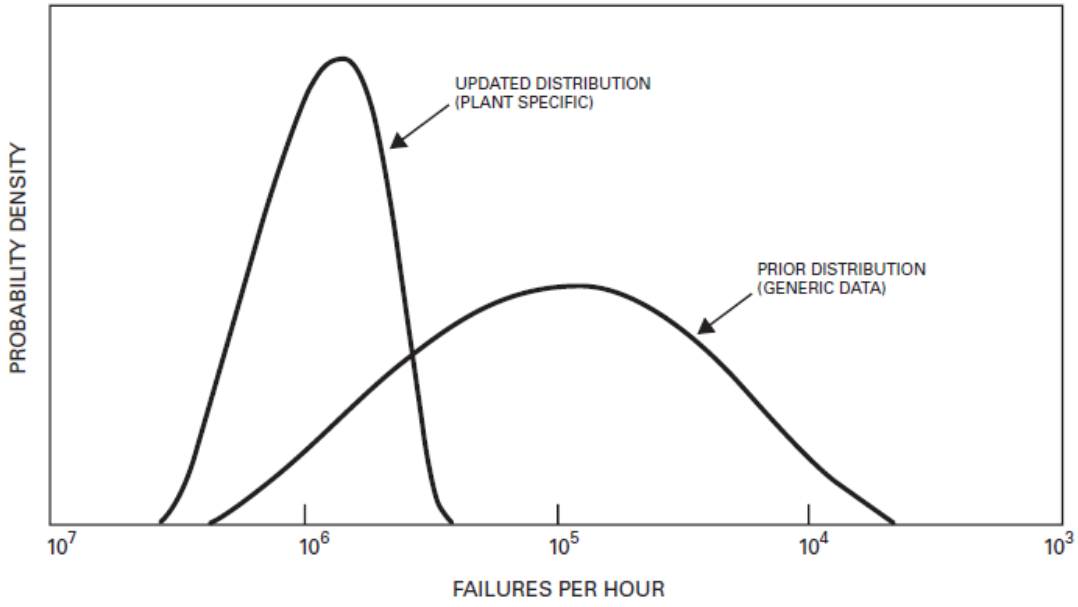


Figura 3.6.b. Distribució anterior i posterior per a la freqüència de fallada d'una bomba.

A la figura 3.6.b es pot observar que la freqüència de fallada s'ha reduït i que la distribució s'ha desplaçat capa a valors més baixos. Aquest desplaçament ha sorgit perquè el rendiment de la bomba ha estat millor del previst.

4. L'Efecte Dòmino en l'Anàlisi Quantitativa de Risc (AQR)

4.1. Definicions

- *AQR*: L'Anàlisi Quantitativa de Risc (AQR) és una eina per a la determinació del risc de l'ús, manipulació, transport i emmagatzematge de substàncies perilloses. L'AQR serveix per demostrar el risc causat per l'activitat desenvolupada i proporcionar a l'autoritat competent la informació rellevant per a prendre decisions respecte l'acceptabilitat del risc associat a l'activitat realitzada a l'interior i entorn de l'establiment o les rutes de transport.

- *Efecte Dòmino (ED):* segons el Purple Book [5] es defineix com l'efecte en què la pèrdua de contenció d'una instal·lació condueix a la pèrdua de contenció en altres instal·lacions.

Segons el *Yellow Book* [11] es defineix com el succés iniciador d'esdemeniments secundaris a causa d'un esdeveniment primari de manera que el resultat és un increment de les conseqüències o àrea d'afectació.

4.2. Legislació i aplicació de l'AQR

A l'estat Espanyol la realització del AQR està legislada per el Reial Decret 1254/1999 del 16 de juliol, mentre que a Catalunya aquesta està regulada en base al Decret 174/2001 de 26 de juny pel qual es regula l'aplicació a Catalunya del RD 1254/1999 de mesures de control dels riscos inherents als accidents greus en els que intervinguin substàncies perilloses.

D'acord amb el Decret esmentat, el AQR és un requeriment per als establiments afectats per la legislació vigent en matèria d'Accidents Greus a nivell alt. Tot i això, la Llei 12/2008 de 31 de juliol de seguretat de les instal·lacions indica que es requerirà una AQR als establiments afectats per Accidents Greus a nivell baix en el moment en què sol·licitin l'autorització ambiental o per ampliacions/modificacions que es puguin considerar com a canvis substancials.

4.3. L'efecte Dòmino a les AQR

D'acord amb la Instrucció 14/2008 SIE *"Criteris per a la realització de les AQR a Catalunya"* , es tindrà en compte l'efecte dòmino alhora d'establir els successos iniciadors específics en la FASE I d'identificació dels iniciadors d'accidents.

Tot i això en la FASE II de determinació de les freqüències dels iniciadors s'especifica que:

"El tractament dels efectes dòmino es considerarà en l'AQR només en la vessant de les probabilitats, com un increment de la freqüència de determinats iniciadors que poden ser originats com conseqüència de l'ocurrència d'un altre iniciador. La informació de partida serà la identificació dels possibles efectes dòmino.[...]. La freqüència dels iniciadors que puguin ser conseqüència, per efecte dòmino, d'altres iniciadors, serà, amb caràcter simplificador, la que correspongui segons el PB gravada amb un factor de 2. Es podrà, alternativament, calcular per suma de la freqüència que indiqui el PB per l'iniciador i la de tots els successos finals de tots els iniciadors que puguin generar l'iniciador."

De manera que en l'estudi d'un accident susceptible de generar efecte dòmino en una instal·lació formada per *n* unitats, la freqüència a considerar en l'AQR és:

$$f_{ED} = f_1 \cdot n \cdot 2$$

5. Metodologia

Es proposa una metodologia senzilla per tal de generar seqüències d'efecte dòmino en instal·lacions d'emmagatzematge, prenent com a punt de partida un esdeveniment inicial de pèrdua de contenció representat per diverses tipologies d'equipament en el Purple Book [5], i finalitzant en el major accident possible que es pot donar en funció de la substància i equipament utilitzat. Un cop s'han generat les seqüències, ja es disposa de les freqüències dels accidents que es poden donar, definides per tipologia d'accident i unitat, de manera que ja es podrà introduir la informació en un software d'anàlisi de risc per a realitzar l'AQR.

La metodologia s'ha programat en MATLAB, i el seu ús en molt intuïtiu i tan sols requereix alguns *inputs* per a produir les seqüències. En el desenvolupament de les seqüències s'han considerat els següents accidents:

- BLEVE (B)

- UVCE (V)

- Flash Fire (F)

- Pool Fire (P)

- Jet Fire (J)

5.1. Descripció de la metodologia

La metodologia ha estat dissenyada per a ser fàcilment implementada en un software, p.e. MATLAB, en el qual l'usuari únicament hagi d'introduir algunes dades entrants i obtingui la freqüència final dels accidents per unitat per a posteriorment introduir-les en un software d'anàlisi com RiskCurves 8.1.

L'algoritme, i els criteris utilitzats per a desenvolupar-lo, que calcula la seqüència i les freqüències finals es presenten a continuació:

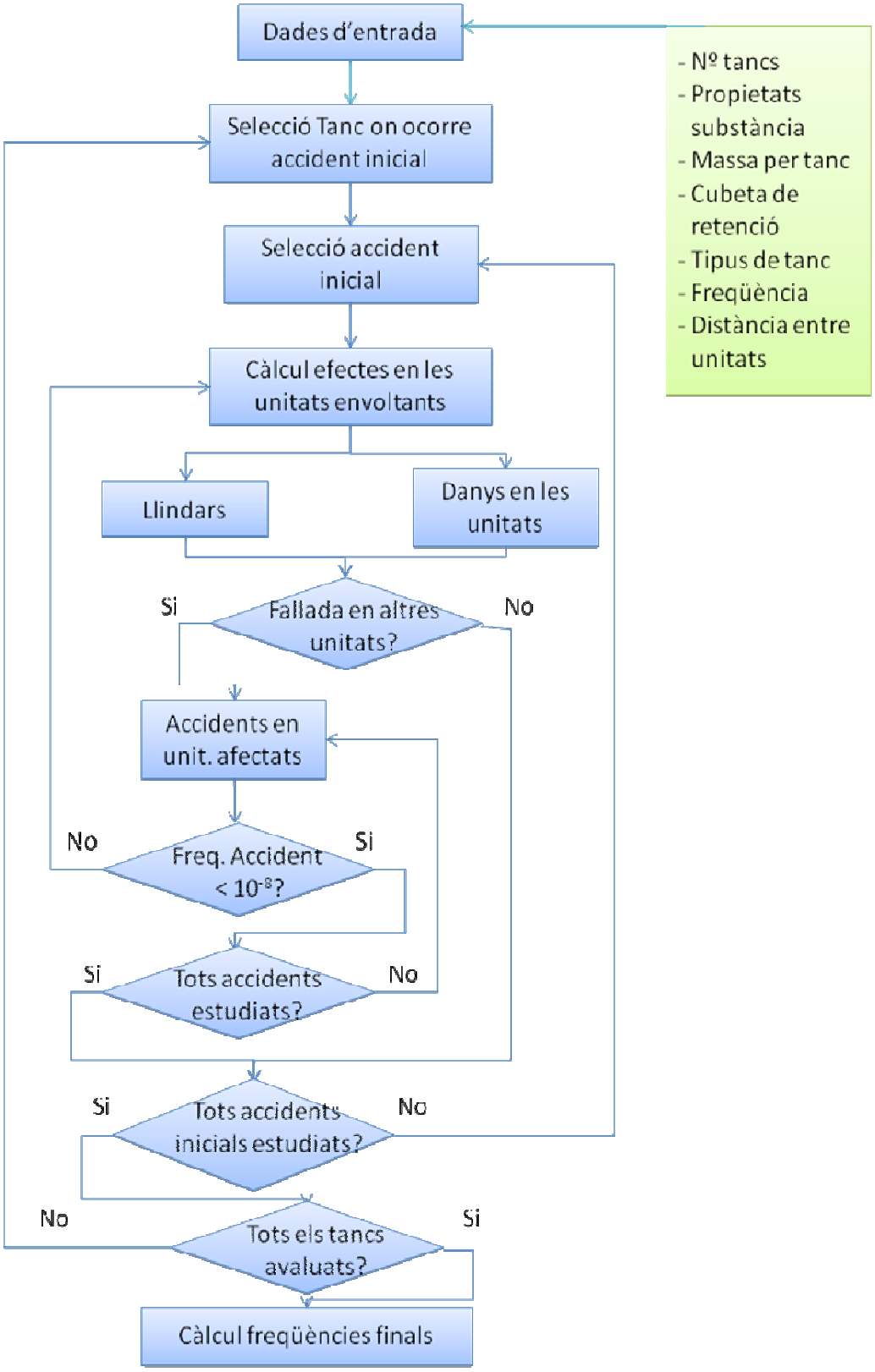


Figura 5.1. Algoritme per al càlcul de seqüències i freqüències.

5.1.1. Dades entrants

Les dades necessàries per a solucionar el problema o que són requerides pel programa per a determinar les seqüències d'accidents són:

- **Nombre de tancs:** la quantitat d'unitats presents a la instal·lació o que són considerades en el disseny. En la metodologia, a cada tanc li és assignat un identificador que és necessari per a realitzar les seqüències dòmino.

- **Propietats de la substància emmagatzemada:** per tal de definir totes les possibles seqüències que poden sorgir en un esdeveniment d'ED, els diferents accidents que es poden donar a cada unitat, així com les conseqüències d'aquests sobre l'equipament de l'entorn; són necessàries algunes propietats termodinàmiques en les condicions d'emmagatzemament tals com: calor de vaporització, densitat, capacitat calorífica.

Altres propietats de la substància, independents de les condicions d'emmagatzematge, també són necessàries: temperatura d'ebullició, pes molecular i velocitat de combustió.

Aquestes propietats s'han de definir per a les substàncies presents a cada tanc.

- **Quantitat present a cada tanc:** la quantitat de matèria que normalment hi ha emmagatzemada a cada unitat. Els efectes i conseqüències d'un accident són directament proporcionals a la massa involucrada, de manera que és una variable important en el mode en què es comporta una seqüència dòmino.

- **Dimensions de la cubeta de retenció per a cada grup de tancs:** la cubeta de retenció s'utilitza en instal·lacions d'emmagatzematge com barrera per retenir la substància en cas de fuita o trencament. Aquesta protecció també serveix per a aïllar les unitats de l'entorn en cas que d'un incendi del toll.

La cubeta de retenció definirà la forma, mida i temps del *Pool Fire*, de manera que afecta significativament a la seqüència d'accidents que es poden donar degut a aquest iniciador.

- **Tipologia de cada tanc:** el tipus de tanc es refereix a algunes de les característiques de les unitats que poden tenir un efecte significatiu sobre el risc.

El més important, és el tipus d'acord a la pressió a la que opera el tanc. Si el tanc és pressuritzat, és possible que en cas d'un accident tèrmic s'origini una BLEVE, cosa que no es pot donar en un tanc atmosfèric.

El tanc també pot ser classificat per la seva forma; en aquesta metodologia s'han considerat esferes, cilindres verticals i cilindres horitzontals.

- **Freqüències d'accident per tanc:** aquest paràmetre es refereix a la freqüència del succés iniciador. En el present projecte s'ha decidit prendre com a pèrdues d'inventari i les seves freqüències les indicades en el Purple Book [5]. Aquests es mostren a la següent taula.

Codi	Definició
G.1	Pèrdua instantània del inventari complet
G.2	Pèrdua continua del inventari complet en 10 minuts en una taxa constant.
G.3	Pèrdua continua a partir d'un forat amb un diàmetre efectiu de 10 mm.

Tipus d'unitat	G.1	G.2	G.3
Tanc pressuritzat	$5 \cdot 10^{-7}$ any^{-1}	$5 \cdot 10^{-7}$ any^{-1}	$1 \cdot 10^{-5}$ any^{-1}
Tanc de procés	$5 \cdot 10^{-6}$ any^{-1}	$5 \cdot 10^{-6}$ any^{-1}	$1 \cdot 10^{-4}$ any^{-1}

Taula 5.1. Accidents i freqüències considerats com a successos iniciadors.

Una vegada s'han definit les pèrdues de contenció (LOCs) i les seves freqüències, es desenvolupa un arbre d'esdeveniments detallant les seqüències que poden ocorre en funció de la unitat afectada, la substància emmagatzemada i el LOC en qüestió. Es calcula la probabilitat d'ocurrència de l'accident final en la unitat. Les probabilitats de l'accident i de la freqüència inicial del LOC amb la que estan relacionades poden combinar-se per calcular la freqüència de l'accident. Un cop més, es pren com a model per a desenvolupar els arbres d'esdeveniments i per calcular les freqüències de l'accident el Purple Book [5].

La darrera informació que és necessària per a definir les seqüències d'accidents i per calcular les freqüències finals dels accidents és la distància entre els tancs de la instal·lació.

5.1.2. Desenvolupament de les seqüències d'accidents

Per tal de desenvolupar les seqüències d'ED que poden sorgir degut a d'un succés iniciador en una unitat, el primer pas consisteix en determinar els accidents i freqüències que poden ocorre a causa de la fuita (LOC).

A continuació es calculen els efectes que tots els possibles accidents a cada tanc podrien provocar a les unitats de l'entorn per tal de definir com es veuen afectats i quins accidents podrien donar-se com a conseqüència de l'accident inicial. Per definir el mode en què una unitat es pot veure afectada i el tipus de fuita que es causa, s'utilitza el LOC de l'accident original combinat amb els llindars que permeten estimar els danys soferts per aquesta segona unitat. Per exemple, si una fuita continua condueix a una explosió del tanc i l'ona de sobrepressió que impacte a la segona unitat disposa d'una pressió superior al llindar establert, causarà una fuita en el segon tanc. Si aquesta fuita serà instantània o continua dependrà de la magnitud de l'ona.

En el model, la seqüència d'ED s'ha organitzat com a arbre d'esdeveniment en el que les probabilitats dels accidents s'arrosseguen a través dels nivells, així que l'accident causat tindrà una probabilitat menor com més nivells s'hagin generat. Quan el darrer accident calculat en la seqüència dòmino succeeix amb una probabilitat inferior a 10^{-8} s'atura la seqüència tot i que no hagin estat afectades totes les unitats de la instal·lació.

5.1.3. Valors llindar d'afectació

Els llindars establerts en el model d'ED es presenten a la taula següent:

Accident	Efecte	Llindar		Conseqüències en tancs pressuritzats
		Tanc Pressuritzat	Tanc Atmosfèric	
BLEVE	Radiació tèrmica (kW/m^2)	≥ 100	≥ 100	Pèrdua G.3
		< 100	< 100	Sense conseqüències
UVCE	Ona de sobrepressió (kPa)	≥ 100	≥ 25	Pèrdua G.1
		53 ≤ ΔP < 100	20 ≤ ΔP < 25	Pèrdua G.2
		30 ≤ ΔP < 53	14 ≤ ΔP < 20	Pèrdua G.3

Accident	Efecte	Llindar		Conseqüències en tancs pressuritzats
		Tanc Pressuritzat	Tanc Atmosfèric	
		$\Delta P < 30$	$\Delta P < 14$	Sense conseqüències
Jet Fire	Longitud del dard (m) Durada del dard (min)	$d_j \geq d$	$d_j \geq d$	Pèrdua G.1
		$d_j < d$ & $l \geq 40$	$d_j < d$ & $l \geq 10$	Pèrdua G.3
		$d_j < d$ & $l < 40$	$d_j < d$ & $l < 10$	Sense conseqüències
Flash Fire	-	-		Sense conseqüències
Pool Fire	Radiació tèrmica (kW/m^2) Durada del pool (min)	$dp \geq d$	$dp \geq d$	Pèrdua G.1
		$50 \leq l$ & $t_p \geq 10$ & $d_j < d$	$15 \leq l$ & $t_p \geq 10$ & $d_j < d$	Pèrdua G.2
		$l \geq 8$ & $d_j < d$	$l \geq 8$ & $d_j < d$	Pèrdua G.3
		$l < 8$	$l < 8$	Sense conseqüències

**Valors obtinguts de les referències [3] i [9].*

On:

d_j: longitud del dard; d_p: longitud del toll; d: distància entre tancs; t_j: durada del dard; t_p: durada del toll.

Taula 5.2. Valors llindar en l'afectació de l'ED.

Tot i que la radiació que emeten pot arribar a ser alta, s'ha considerat que els *Flash Fires* no provoquen conseqüències significatives en altres unitats degut a la seva escassa durada.

Els *Jet Fires* han estat avaluats d'acord a la seva longitud i a la radiació tèrmica que emeten. S'ha considerat que si un *Jet Fire* impacta contra un altre tanc provocarà, per efecte dòmino, la conseqüència més greu, mentre que si no arriba a impactar però emet una certa radiació tèrmica provocarà una fuita menor a la unitat afectada.

Determinar llindars per a la radiació emesa per una *Pool Fire* pot ser complex, de manera que en aquest projecte s'ha pres el següent criteri: si el toll cobreix completament les altres

unitats, aquestes patiran una fuita instantània, mentre que experimentaran una fuita tipus G.2 en el cas que el tanc hagi estat exposat a una certa intensitat de radiació durant cert temps. El valor per a la fuita tipus G.3 és el més utilitzat a Catalunya per especificar que pot donar-se ED després que un tanc hagi estat exposat a la intensitat de radiació definida a la taula.

La projecció de fragments no ha estat considerada en els càlculs a causa que no es disposa de models que es puguin aplicar per a descriure amb precisió la trajectòria o radi de l'efecte.

A mode d'exemple per il·lustrar l'ús dels llindars establerts es mostra el següent cas:

Si es genera un *Pool Fire* degut a una fuita instantània i una segona unitat pressuritzada rep la dosi de radiació tèrmica equivalent a 60 kW/m^2 durant 10 minuts, es donarà una fuita del inventari total de la unitat afectada en 10 minuts (LOC G.2).

És important mencionar que diferents equipaments poden fallar a llindars diferents i que els criteris llindar poden variar significativament d'acord a diverses fonts. La taula tan sols presenta els valors utilitzats en el projecte, però poden ser modificats quan es defineixen més acuradament.

5.1.4. Càlcul de la freqüència final

Un cop han estat generades totes les seqüències dòmino i s'han definit les freqüències de cada nivell per a cada unitat i LOC, es sumen les freqüències de cada tipus d'accident de tots els tancs de la instal·lació que poden patir determinat accident.

6. Aplicació de la metodologia. Casos d'estudi

6.1. Enunciat

Com a cas d'estudi s'ha pres una instal·lació d'emmagatzematge de propà amb tancs cilíndrics pressuritzats disposada a l'exterior d'edificacions. Les condicions atmosfèriques sota les que s'han realitzat les explotacions del model estan representades a la taula següent:

Paràmetre	Valor
Temperatura (K)	298,15
Humitat relativa (%)	70
Classe d'Estabilitat Atmosfèrica	D
Velocitat del vent (m/s)	5
Coeficient de rugositat del terreny (cm)	10
Pressió dels tancs (bar)	9,51
Temperatura dels tancs (K)	298,15

Taula 6.1.a. Condicions atmosfèriques i d'emmagatzemament dels casos d'estudi.

Donat que l'abast de l'estudi es restringeix a instal·lacions amb capacitat d'emmagatzemament mitjana, la quantitat de propà s'ha anat incrementant des de 5.000 kg fins a 100.000 kg, seguint l'evolució següent:

1 - 5.000 kg

2 - 10.000 kg

3 - 20.000 kg

4 - 50.000 kg

5 - 100.000 kg

Pel que fa al nombre de tancs que formen la instal·lació, s'han estudiat el risc associat a la instal·lació per diferents dissenys; per a cada quantitat anterior des de 1 a 4 tancs.

S'han tingut en compte mesures de seguretat com les cubetes de retenció i cal destacar que, referent a la distància entre tancs, aquests es disposaven respectant els criteris establerts a la distància mínima entre tancs en el codi NFPA 58 [6]. Les distàncies mínimes es mostren a la taula següent:

Capacitat d'aigua per unitat (m^3)	Distància mínima entre tancs (m)
C < 0,5	0
0,5 ≤ C ≤ 1,0	0
1,0 < C ≤ 1,9	1
1,9 < C ≤ 7,6	1
7,6 < C ≤ 114	1,5
114 < C ≤ 265	¼ de la suma dels diàmetres dels contenidors adjacents
265 < C ≤ 341	
341 < C ≤ 454	
454 < C ≤ 757	
757< C ≤ 3.758	
C > 3.758	

Taula 6.1.b. Distàncies mínimes entre tancs segons el codi NFPA 58.

Respecte a la distribució dels tancs a l'interior de les cubetes de retenció, s'ha incorporat al model de simulació lògica per tal que aquests es disposen en fila un al costat de l'altre, de manera que coincideixin els seus eixos transversals. A la figura següent es mostra una esquema de la disposició dels tancs:

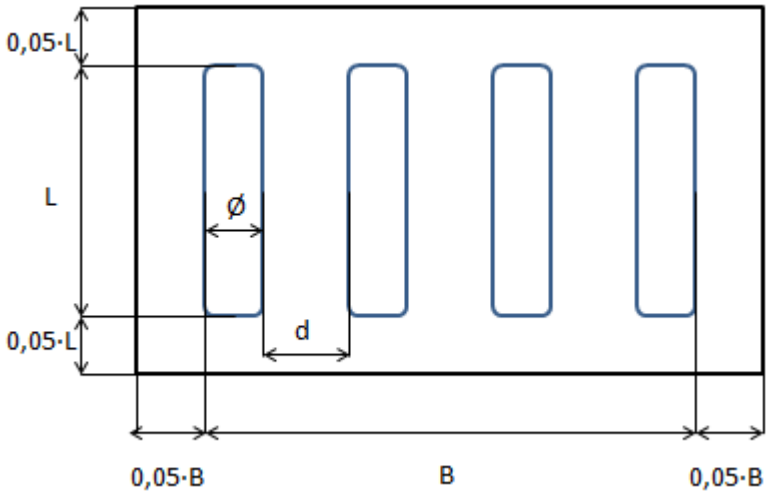


Figura 6.1.c. Esquema de la distribució dels tancs a l'interior de la cubeta de retenció.

Cal destacar que el model dissenyat no contempla cap mena de factor d'apantallament entre tancs, de manera que alhora de calcular les conseqüències dels efectes d'un tanc sobre la resta no hi ha una reducció d'aquest per l'apantallament.

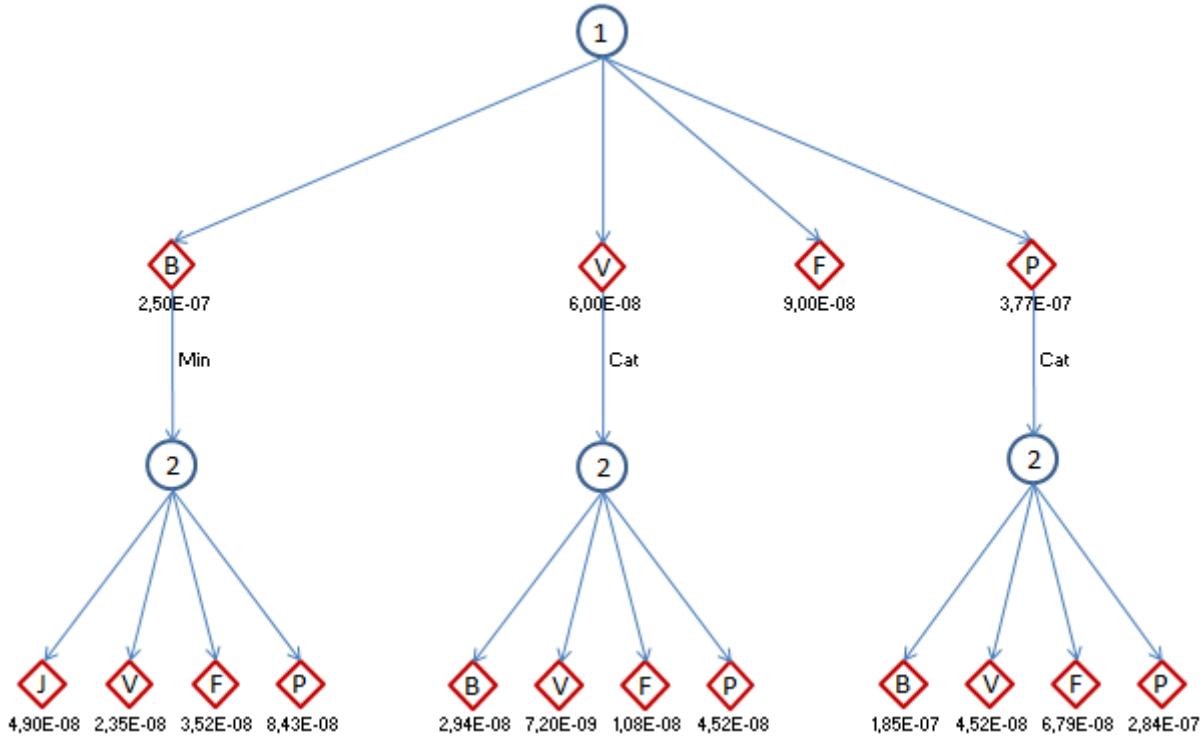
6.2. Resultats

S'han realitzat un total de 90 explotacions del model (des de 1 a 4 tancs, des de 5.000 a 100.000 kg per a cada un dels 3 possibles LOCs definits pel Purple Book [5]) a partir de les quals s'han obtingut els arbres d'esdeveniments per a cada una d'aquestes. La diferència entre de les 90 explotacions realitzades a les 60 teòriques es deu a què s'ha realitzat dues simulacions per a cada situació en els casos en què el nombre de tancs és 3 i 4, ja que s'ha cregut convenient estudiar per separat les freqüències en el casos en què els succés iniciador de la seqüència s'ha donat en un tanc situat als extrems o en un tanc situat entre altres tancs.

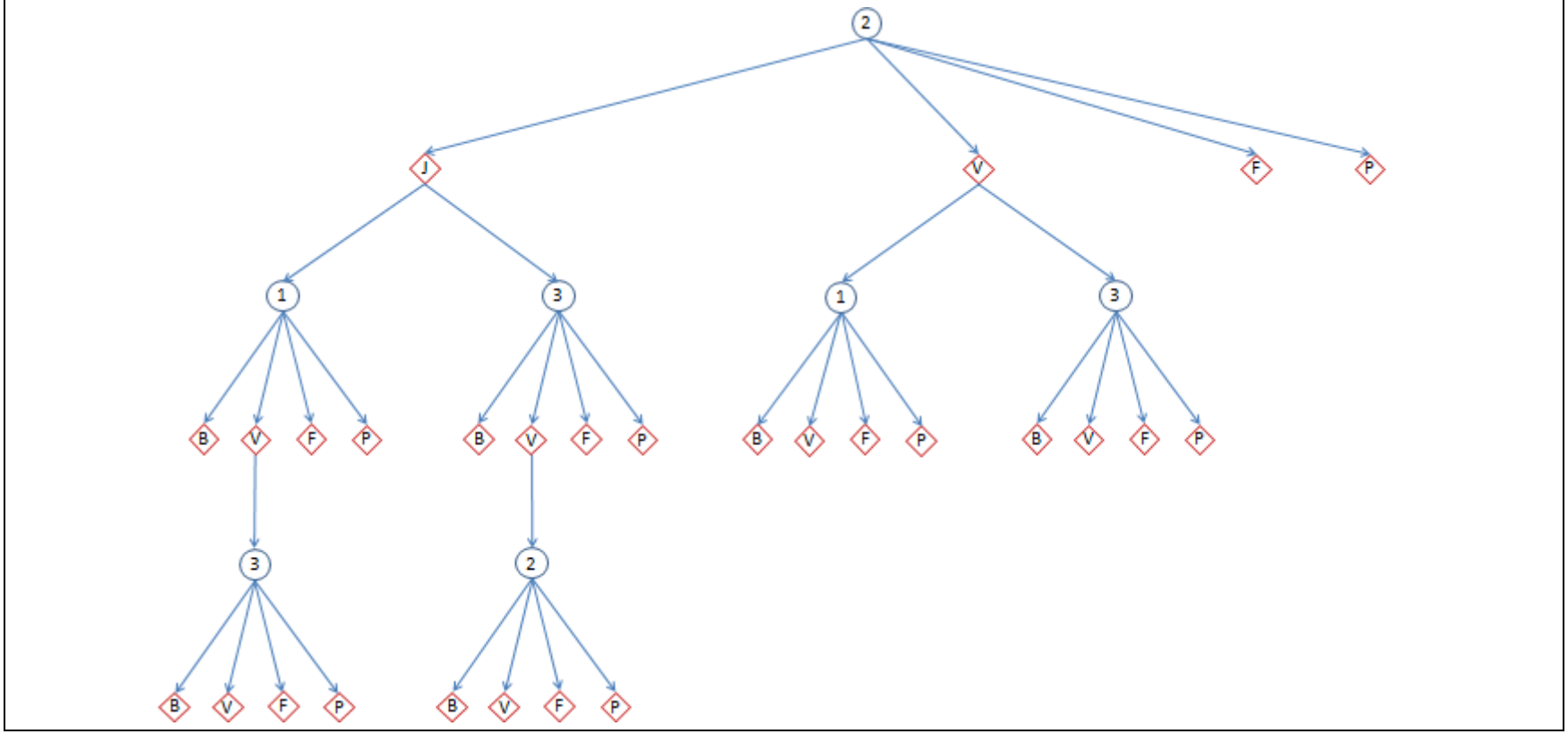
A continuació es mostren, a mode d'exemple, dos arbres d'esdeveniments dels extrets a partir de la informació facilitada pel programa.

Seguidament dels arbres d'esdeveniments es mostraran les taules amb els valors de freqüència obtinguts per a cada tipus d'accident, quantitat de matèria, número de tancs i tipus de succés iniciador es mostren a continuació:

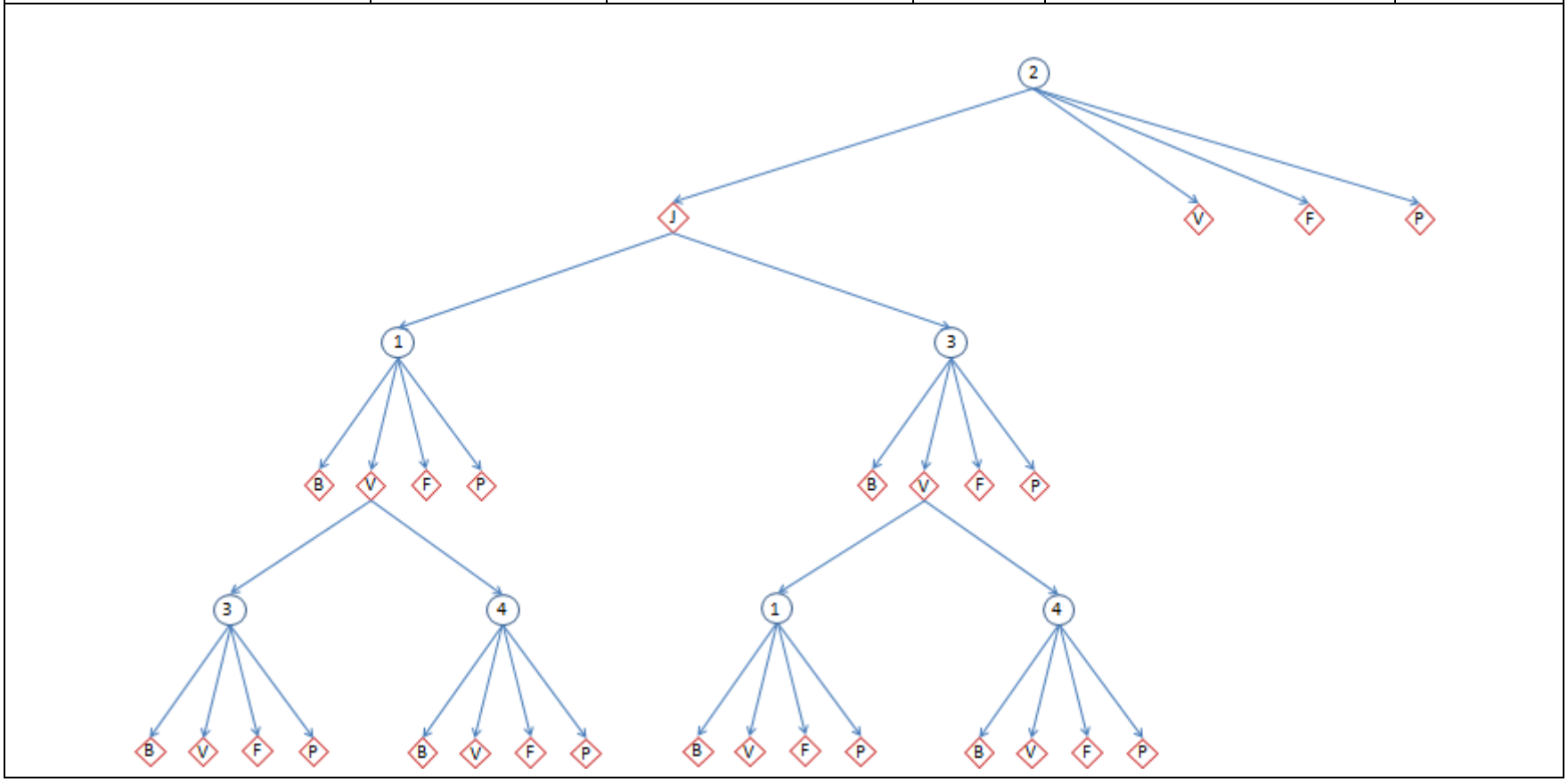
Arbre d'esdeveniment. Exemple 1					
Succés iniciador	Fuita Instantània	Massa involucrada (kg)	100.000	Distància entre tancs (m)	1,43
Freqüència succés iniciador	$5 \cdot 10^{-7}$ any^{-1}	Nº de tancs	2	Dimensions de la cubeta (LxB)	7,9 m x 21,5 m



Arbre d'esdeveniment. Exemple 2.					
Succés iniciador	Fuita Cont. 10 min.	Massa involucrada (kg)	10.000	Distància entre tancs (m)	1,5
Freqüència succés iniciador	$5 \cdot 10^{-7}$ any^{-1}	Nº de tancs	3	Dimensions de la cubeta (LxB)	7,1 m x 8,7 m



Arbre d'esdeveniment. Exemple 3.					
Succés iniciador	Fuita Cont. 10 mm.	Massa involucrada (kg)	10.000	Distància entre tancs (m)	1,5
Freqüència succés iniciador	$1 \cdot 10^{-5}$ any^{-1}	Nº de tancs	4	Dimensions de la cubeta (LxB)	9,6 m x 7,9 m



BLEVE (valors de la freqüència de l'accident obtinguts amb el model, any^{-1})														
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$1{,}75\cdot10^{-7}$	$1{,}90\cdot10^{-6}$	$5{,}77\cdot10^{-6}$	$1{,}04\cdot10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	10.000	$1{,}75\cdot10^{-7}$	$1{,}90\cdot10^{-6}$	$4{,}12\cdot10^{-6}$	$6{,}89\cdot10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	20.000	$2{,}45\cdot10^{-7}$	$3{,}44\cdot10^{-6}$	$5{,}13\cdot10^{-6}$	$6{,}87\cdot10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	50.000	$2{,}45\cdot10^{-7}$	$3{,}44\cdot10^{-6}$	$9{,}95\cdot10^{-6}$	$2{,}21\cdot10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	100.000	$2{,}45\cdot10^{-7}$	$3{,}44\cdot10^{-6}$	$1{,}18\cdot10^{-5}$	$2{,}10\cdot10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

BLEVE (valors de la freqüència de l'accident, segons la normativa de l'AQR, any^{-1})														
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$1{,}75\cdot10^{-7}$	$7{,}00\cdot10^{-7}$	$1{,}05\cdot10^{-6}$	$1{,}40\cdot10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	10.000	$1{,}75\cdot10^{-7}$	$7{,}00\cdot10^{-7}$	$1{,}05\cdot10^{-6}$	$1{,}40\cdot10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	20.000	$2{,}45\cdot10^{-7}$	$9{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}47\cdot10^{-6}$	$1{,}96\cdot10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	50.000	$2{,}45\cdot10^{-7}$	$9{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}47\cdot10^{-6}$	$1{,}96\cdot10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-
	100.000	$2{,}45\cdot10^{-7}$	$9{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}47\cdot10^{-6}$	$1{,}96\cdot10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

UVCE (valors de la freqüència de l'accident obtinguts amb el model, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$6{,}50\cdot10^{-7}$	$2{,}05\cdot10^{-6}$	$3{,}55\cdot10^{-6}$	$4{,}80\cdot10^{-8}$	$9{,}60\cdot10^{-8}$	$1{,}44\cdot10^{-7}$	$1{,}92\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}92\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$
	10.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$6{,}50\cdot10^{-7}$	$1{,}41\cdot10^{-6}$	$2{,}36\cdot10^{-6}$	$4{,}80\cdot10^{-8}$	$9{,}60\cdot10^{-8}$	$1{,}44\cdot10^{-7}$	$1{,}92\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}92\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$
	20.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$8{,}43\cdot10^{-7}$	$1{,}76\cdot10^{-6}$	$2{,}36\cdot10^{-6}$	$3{,}00\cdot10^{-8}$	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$7{,}64\cdot10^{-7}$	$1{,}92\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}92\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$
	50.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$8{,}43\cdot10^{-7}$	$2{,}34\cdot10^{-6}$	$7{,}01\cdot10^{-6}$	$3{,}00\cdot10^{-8}$	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$3{,}44\cdot10^{-7}$	$4{,}60\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}92\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$4{,}27\cdot10^{-6}$
	100.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$8{,}43\cdot10^{-7}$	$2{,}89\cdot10^{-6}$	$5{,}27\cdot10^{-6}$	$3{,}00\cdot10^{-8}$	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}20\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}97\cdot10^{-6}$	$3{,}21\cdot10^{-6}$	$5{,}21\cdot10^{-6}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

UVCE (valors de la freqüència de l'accident segons la normativa de l'AQR, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$4{,}80\cdot10^{-7}$	$4{,}80\cdot10^{-8}$	$1{,}92\cdot10^{-7}$	$2{,}88\cdot10^{-7}$	$3{,}84\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$7{,}68\cdot10^{-6}$
	10.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$4{,}80\cdot10^{-7}$	$4{,}80\cdot10^{-8}$	$1{,}92\cdot10^{-7}$	$2{,}88\cdot10^{-7}$	$3{,}84\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$7{,}68\cdot10^{-6}$
	20.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$4{,}80\cdot10^{-7}$	$3{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}20\cdot10^{-7}$	$1{,}80\cdot10^{-7}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$7{,}68\cdot10^{-6}$
	50.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$4{,}80\cdot10^{-7}$	$3{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}20\cdot10^{-7}$	$1{,}80\cdot10^{-7}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$7{,}68\cdot10^{-6}$
	100.000	$6{,}00\cdot10^{-8}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$4{,}80\cdot10^{-7}$	$3{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}20\cdot10^{-7}$	$1{,}80\cdot10^{-7}$	$2{,}40\cdot10^{-7}$	$9{,}60\cdot10^{-7}$	$3{,}84\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$7{,}68\cdot10^{-6}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

FLASH FIRE (valors de la freqüència de l'accident obtinguts amb el model, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$9{,}75\cdot10^{-7}$	$3{,}32\cdot10^{-6}$	$5{,}28\cdot10^{-6}$	$7{,}20\cdot10^{-8}$	$1{,}44\cdot10^{-7}$	$2{,}16\cdot10^{-7}$	$2{,}88\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$4{,}32\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$
	10.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$9{,}75\cdot10^{-7}$	$2{,}47\cdot10^{-6}$	$3{,}54\cdot10^{-6}$	$7{,}20\cdot10^{-8}$	$1{,}44\cdot10^{-7}$	$2{,}16\cdot10^{-7}$	$2{,}88\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$4{,}32\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$
	20.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}26\cdot10^{-6}$	$2{,}64\cdot10^{-6}$	$3{,}57\cdot10^{-6}$	$4{,}50\cdot10^{-8}$	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}15\cdot10^{-7}$	$2{,}88\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$4{,}32\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$
	50.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}26\cdot10^{-6}$	$3{,}61\cdot10^{-6}$	$7{,}83\cdot10^{-6}$	$4{,}50\cdot10^{-8}$	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$5{,}16\cdot10^{-7}$	$6{,}91\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$2{,}88\cdot10^{-6}$	$4{,}32\cdot10^{-6}$	$6{,}50\cdot10^{-6}$
	100.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}26\cdot10^{-6}$	$4{,}20\cdot10^{-6}$	$7{,}70\cdot10^{-6}$	$4{,}50\cdot10^{-8}$	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}35\cdot10^{-7}$	$1{,}80\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$2{,}95\cdot10^{-6}$	$4{,}81\cdot10^{-6}$	$7{,}81\cdot10^{-6}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

FLASH FIRE (valors de la freqüència de l'accident segons la normativa de l'AQR, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-7}$	$7{,}20\cdot10^{-7}$	$7{,}20\cdot10^{-8}$	$2{,}88\cdot10^{-7}$	$4{,}32\cdot10^{-7}$	$5{,}76\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$8{,}64\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-5}$
	10.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-7}$	$7{,}20\cdot10^{-7}$	$7{,}20\cdot10^{-8}$	$2{,}88\cdot10^{-7}$	$4{,}32\cdot10^{-7}$	$5{,}76\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$8{,}64\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-5}$
	20.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-7}$	$7{,}20\cdot10^{-7}$	$4{,}50\cdot10^{-8}$	$1{,}80\cdot10^{-7}$	$2{,}70\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$8{,}64\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-5}$
	50.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-7}$	$7{,}20\cdot10^{-7}$	$4{,}50\cdot10^{-8}$	$1{,}80\cdot10^{-7}$	$2{,}70\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$8{,}64\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-5}$
	100.000	$9{,}00\cdot10^{-8}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-7}$	$7{,}20\cdot10^{-7}$	$4{,}50\cdot10^{-8}$	$1{,}80\cdot10^{-7}$	$2{,}70\cdot10^{-7}$	$3{,}60\cdot10^{-7}$	$1{,}44\cdot10^{-6}$	$5{,}76\cdot10^{-6}$	$8{,}64\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-5}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

POOL FIRE (valors de la freqüència de l'accident obtinguts amb el model, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$2,95\cdot10^{-7}$	$3,20\cdot10^{-6}$	$7,26\cdot10^{-6}$	$1,75\cdot10^{-5}$	$1,72\cdot10^{-7}$	$3,44\cdot10^{-7}$	$5,16\cdot10^{-7}$	$6,88\cdot10^{-7}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$6,88\cdot10^{-6}$	$1,03\cdot10^{-5}$	$1,38\cdot10^{-5}$
	10.000	$2,95\cdot10^{-7}$	$4,44\cdot10^{-6}$	$6,95\cdot10^{-6}$	$1,16\cdot10^{-5}$	$1,72\cdot10^{-7}$	$3,44\cdot10^{-7}$	$5,16\cdot10^{-7}$	$6,88\cdot10^{-7}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$6,88\cdot10^{-6}$	$1,03\cdot10^{-5}$	$1,38\cdot10^{-5}$
	20.000	$3,77\cdot10^{-7}$	$5,30\cdot10^{-6}$	$8,54\cdot10^{-6}$	$1,16\cdot10^{-5}$	$2,95\cdot10^{-7}$	$5,90\cdot10^{-7}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$6,88\cdot10^{-7}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$6,88\cdot10^{-6}$	$1,03\cdot10^{-5}$	$1,38\cdot10^{-5}$
	50.000	$3,77\cdot10^{-7}$	$5,30\cdot10^{-6}$	$1,53\cdot10^{-5}$	$2,83\cdot10^{-5}$	$2,95\cdot10^{-7}$	$5,90\cdot10^{-7}$	$1,59\cdot10^{-6}$	$2,96\cdot10^{-6}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$6,88\cdot10^{-6}$	$1,03\cdot10^{-5}$	$1,55\cdot10^{-5}$
	100.000	$3,77\cdot10^{-7}$	$5,30\cdot10^{-6}$	$1,78\cdot10^{-5}$	$2,95\cdot10^{-5}$	$2,95\cdot10^{-7}$	$5,90\cdot10^{-7}$	$8,85\cdot10^{-7}$	$1,18\cdot10^{-6}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$7,05\cdot10^{-6}$	$1,15\cdot10^{-5}$	$1,87\cdot10^{-5}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

POOL FIRE (valors de la freqüència de l'accident segons la normativa de l'AQR, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	$2,95\cdot10^{-7}$	$1,18\cdot10^{-6}$	$1,77\cdot10^{-6}$	$2,36\cdot10^{-6}$	$1,72\cdot10^{-7}$	$6,88\cdot10^{-7}$	$1,03\cdot10^{-6}$	$1,38\cdot10^{-6}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$1,37\cdot10^{-5}$	$2,06\cdot10^{-5}$	$2,75\cdot10^{-5}$
	10.000	$2,95\cdot10^{-7}$	$1,18\cdot10^{-6}$	$1,77\cdot10^{-6}$	$2,36\cdot10^{-6}$	$1,72\cdot10^{-7}$	$6,88\cdot10^{-7}$	$1,03\cdot10^{-6}$	$1,38\cdot10^{-6}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$1,37\cdot10^{-5}$	$2,06\cdot10^{-5}$	$2,75\cdot10^{-5}$
	20.000	$3,77\cdot10^{-7}$	$1,51\cdot10^{-6}$	$2,26\cdot10^{-6}$	$3,02\cdot10^{-6}$	$2,95\cdot10^{-7}$	$1,18\cdot10^{-6}$	$1,77\cdot10^{-6}$	$2,36\cdot10^{-6}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$1,37\cdot10^{-5}$	$2,06\cdot10^{-5}$	$2,75\cdot10^{-5}$
	50.000	$3,77\cdot10^{-7}$	$1,51\cdot10^{-6}$	$2,26\cdot10^{-6}$	$3,02\cdot10^{-6}$	$2,95\cdot10^{-7}$	$1,18\cdot10^{-6}$	$1,77\cdot10^{-6}$	$2,36\cdot10^{-6}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$1,37\cdot10^{-5}$	$2,06\cdot10^{-5}$	$2,75\cdot10^{-5}$
	100.000	$3,77\cdot10^{-7}$	$1,51\cdot10^{-6}$	$2,26\cdot10^{-6}$	$3,02\cdot10^{-6}$	$2,95\cdot10^{-7}$	$1,18\cdot10^{-6}$	$1,77\cdot10^{-6}$	$2,36\cdot10^{-6}$	$3,44\cdot10^{-6}$	$1,37\cdot10^{-5}$	$2,06\cdot10^{-5}$	$2,75\cdot10^{-5}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

JET FIRE (valors de la freqüència de l'accident obtinguts amb el model, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	-	-	-	-	$1{,}00\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-7}$	$3{,}00\cdot10^{-7}$	$4{,}00\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$4{,}00\cdot10^{-6}$	$6{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$
	10.000	-	-	-	-	$1{,}00\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-7}$	$3{,}00\cdot10^{-7}$	$4{,}00\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$4{,}00\cdot10^{-6}$	$6{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$
	20.000	-	-	-	-	$2{,}50\cdot10^{-7}$	$5{,}00\cdot10^{-7}$	$6{,}37\cdot10^{-6}$	$4{,}00\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$4{,}00\cdot10^{-6}$	$6{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$
	50.000	-	-	-	-	$2{,}50\cdot10^{-7}$	$5{,}00\cdot10^{-7}$	$3{,}19\cdot10^{-6}$	$3{,}07\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$4{,}00\cdot10^{-6}$	$6{,}00\cdot10^{-6}$	$9{,}02\cdot10^{-6}$
	100.000	-	-	-	-	$2{,}50\cdot10^{-7}$	$5{,}00\cdot10^{-7}$	$7{,}50\cdot10^{-7}$	$1{,}00\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$4{,}10\cdot10^{-6}$	$6{,}69\cdot10^{-6}$	$1{,}09\cdot10^{-5}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

JET FIRE (valors de la freqüència de l'accident segons la normativa de l'AQR, any^{-1})												
	n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa (kg)	5.000	-	-	-	-	$1{,}00\cdot10^{-7}$	$4{,}00\cdot10^{-7}$	$6{,}00\cdot10^{-7}$	$8{,}00\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}20\cdot10^{-5}$	$1{,}60\cdot10^{-5}$
	10.000	-	-	-	-	$1{,}00\cdot10^{-7}$	$4{,}00\cdot10^{-7}$	$6{,}00\cdot10^{-7}$	$8{,}00\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}20\cdot10^{-5}$	$1{,}60\cdot10^{-5}$
	20.000	-	-	-	-	$2{,}50\cdot10^{-7}$	$1{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}50\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}20\cdot10^{-5}$	$1{,}60\cdot10^{-5}$
	50.000	-	-	-	-	$2{,}50\cdot10^{-7}$	$1{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}50\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}20\cdot10^{-5}$	$1{,}60\cdot10^{-5}$
	100.000	-	-	-	-	$2{,}50\cdot10^{-7}$	$1{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}50\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$2{,}00\cdot10^{-6}$	$8{,}00\cdot10^{-6}$	$1{,}20\cdot10^{-5}$	$1{,}60\cdot10^{-5}$
		Generat per un LOC G.1				Generat per un LOC G.2				Generat per un LOC G.3			

6.3. Anàlisi de resultats

A continuació mostrarem els resultats obtinguts de forma gràfica y analitzarem els resultats per tal de donar resposta a l'objectiu principal del projecte. S'ha considerat que la millor manera d'analitzar els resultats és en funció de la tipologia d'accident.

Cal destacar que el comportament dels efectes generats per un mateix succés (G.1, G.2 o G.3) hauria de ser pràcticament idèntic o molt similar en tots els casos. Aquest és un resultat és lògic donat que per tal d'estudiar totes els esdeveniments possibles, el model matemàtic té en compte tots els possibles efectes que poden sorgir com a conseqüència d'un succés. De manera que quan es dóna una pèrdua d'inventari el model sempre indica la probabilitat que ocorrin totes les opcions (els 4 accidents estudiats per tipologia de pèrdua d'inventari), de manera que el nombre de vegades que apareixen cada un d'aquests 4 en un mateix arbre és la mateixa, radicant la diferència entre ells en les probabilitats d'ocurrència.

El model ha estat dissenyat per tal que indiqui la tipologia de pèrdua del inventari que ha sofert el tanc que genera el succés, de manera que per a cada tipologia s'han considerat els efecte següents:

- Pèrdua instantània del inventari: BLEVE, UVCE, Flash Fire i Pool Fire

- Pèrdua continua del inventari durant 10 minuts: Jet Fire, UVCE, Flash Fire i Pool Fire

- Pèrdua continua per un forat de 10 mm: Jet FIre, UVCE, Flash Fire i Pool Fire.

6.3.1. BLEVE

Pel que fa a la comparació entre el model i l'AQR en referència a la BLEVE, els resultats obtinguts mostren que la freqüència segons els model proposat en el projecte és molt superior a la freqüència obtinguda amb la metodologia utilitzada per a la realització de les AQR, obtenint-se freqüències amb una diferència superior a un ordre de magnitud. Tot i que per a totes les quantitats estudiades la diferència és molt gran, pels casos amb més quantitat emmagatzemada aquest es veu lleugerament incrementada.

Pel que fa a la diferència de les freqüències en funció de les variables del cas d'estudi, a continuació es mostren els resultats obtinguts:

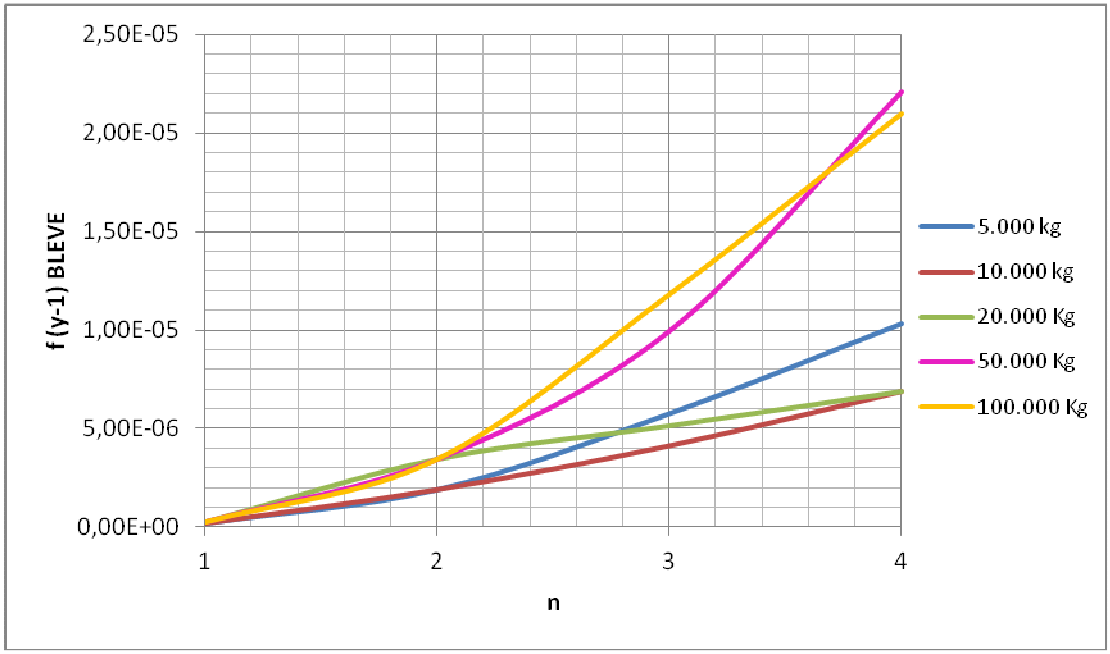


Figura 6.3.1.a. Valors de les freqüències finals de BLEVE en funció del nombre de tancs

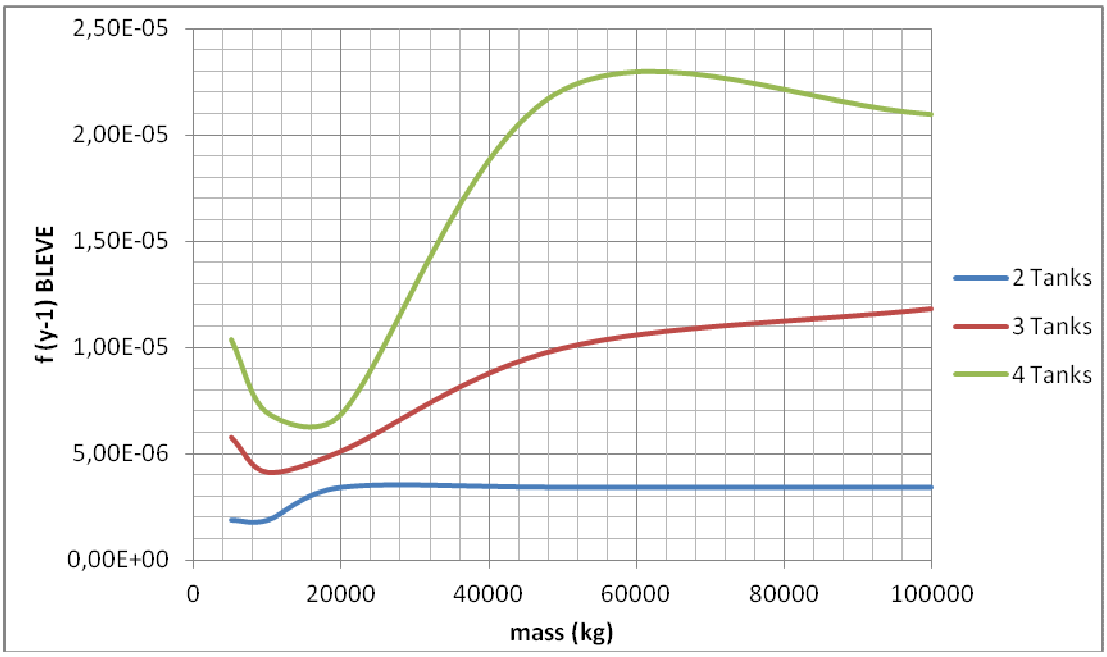


Figura 6.3.1.b. Valors de les freqüències finals de BLEVE en funció de la massa emmagatzemada

A la figura 6.3.1.a es pot observar que 4 de les corbes segueixen una tendència clarament potencial, a excepció de la coresponent a 20.000 kg que també manté un augment de la

freqüència amb la massa , de manera que es pot considerar que el comportament de les corbes és quasi homogeni. Un comportament potencial de les corbes de freqüència és el resultat que s'esperava donat que en tenir en comppte l'efecte dominó entre els tancs, en considerar més tancs no tan sols s'incrementa la freqüència d'ocurrència a la instal·lació pels esdeveniments que pugui experimentar cada tanc en forma de succés iniciador sinó també pels successos que experimenten els tancs causats pels accidents a la resta de tancs.

A la figura 6.3.1.b s'observa que la freqüència de BLEVE és menor per 10.000 i 20.000 kg que pel cas amb 5.000 kg, però que passat el llindar de 20.000 kg la freqüència augmenta per quedar-se constant per quantitats superiors als 50.000 kg. A més, es pot comprovar que per a totes les quantitats, el nombre de tancs és un factor determinant, donat que a major n major freqüència.

Tot i ser uns resultats prou clars, s'observen dues irregularitats:

1 - El fet que la corba de 50.000 kg obtingui una freqüència final major que la de 100.000 kg.

Tenint en compte que les freqüències obtingudes indiquen la freqüència amb la qual es donarà un accident a tota la instal·lació, aquest fet no es pot explicar si no es té en compte el conjunt d'arbres d'esdeveniments en els casos de 50.000 i 100.000 kg amb 4 tancs. Cercant la font d'aquest lleuger increment, es determina que aquest sorgeix com a conseqüència de la seqüència d'accidents pel cas de 50.000 kg en 4 tancs.

2 - El fet que una instal·lació amb 5.000 kg obtingui una freqüència d'ocurrència superior a la de 10.000 i 20.000 kg amb un nombre de tancs igual i superior a 3.

El motiu que pot donar explicació a aquest fet és que segons la NFPA 58 [6] la distància entre tancs per una instal·lació amb 5.000 kg de propà és d'1 metre, mentre que per als altres dos casos és d'1,5 metres. Aquest fet provoca que un Jet Fire en el tanc 1 d'una instal·lació causi danys en els tancs 2 i 3 (obviant l'apantallament), enlloc de causar-los tan sols al tanc més proper.

6.3.2. UVCE generada per una pèrdua instantània del inventari

En aquest cas tan sols s'han contemplat les explosions de vapor no confinades sorgides com a conseqüència d'una pèrdua instantània del inventari (G.1) i s'han obviat les originades per fuites continues (G.2 i G.3).

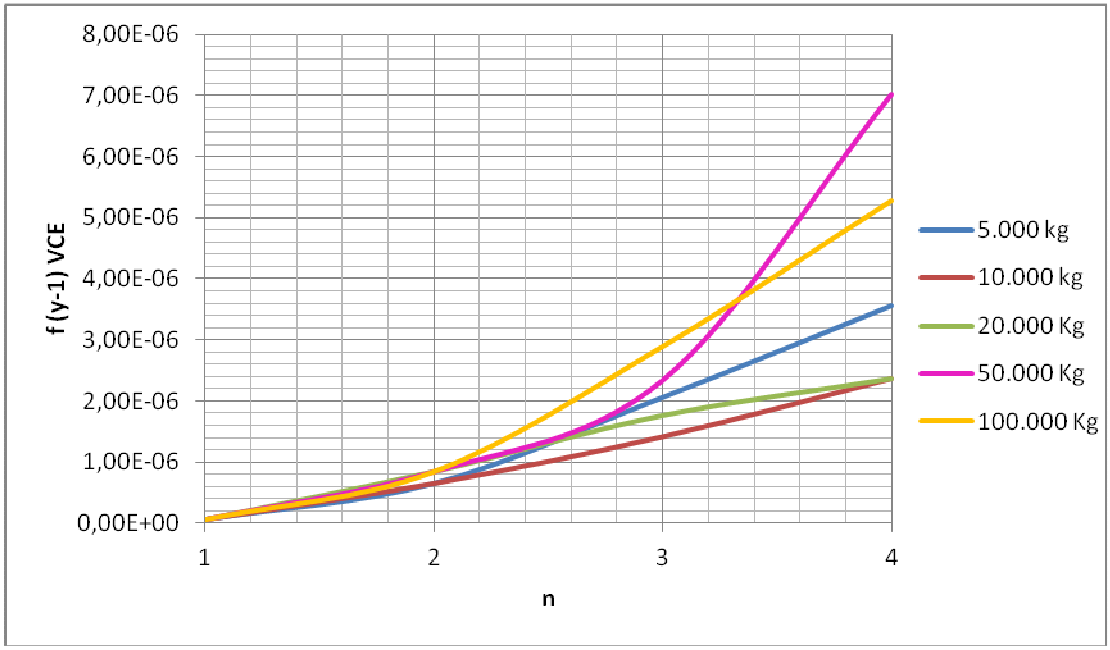


Figura 6.3.2.a. Valors de les freqüències finals de UVCE en funció del nombre de tancs.

A la figura superior es pot observar, igual que al cas de la BLEVE, que 4 de les corbes segueixen una tendència potencial a excepció de la corresponent a 20.000 kg. També igual que al cas anterior, en aquest també es poden observar les dues mateixes irregularitats, que es podrien explicar en base als mateixos criteris exposats pel cas de la BLEVE.

Com ja s'ha comentat al punt anterior, l'anàlisi d'aquestes gràfiques s'ha de realitzar a partir del conjunt d'arbres d'esdeveniments obtinguts per a cada situació. Per tal de deduir les circumstàncies que porten a que la corva de 50.000 kg obtingui una freqüència final major que la de 100.000 kg prendrem els dos conjunts d'arbres. De l'anàlisi es dedueix que el sobtat increment de la freqüència en la instal·lació amb 50.000 kg que es veu a la figura (corva rosa) ve originat per les conseqüències que provoca en la resta de tancs un *Pool Fire* donat com a succés iniciador d'una pèrdua continua de l'inventari durant 10 minuts, ja que els efectes a la resta de tancs són més i de majora gravetat en la primera situació.

Donat que les conseqüències d'un *Pool Fire* es calculen en base a 3 factors: transmitància (en tractar-se de les mateixes condicions atmosfèriques aquesta es manté constant en totes les explotacions realitzades del model), factor de vista (la superfície de la cubeta de retenció estarà totalment coberta pel toll de manera que els tancs es troben a l'interior de l'incendi i, per tant, el factor de vista és igual a 1) i el poder emissiu que és l'únic factor que no és constant en tots els casos (és directament proporcional a la relació L/D i, per tant, a major diàmetre equivalent menor poder emissiu). Aquest fet podria provocar una disminució

en el poder emissiu entre els dos escenaris, cosa que podria fer que els efectes del Pool disminuïssin.

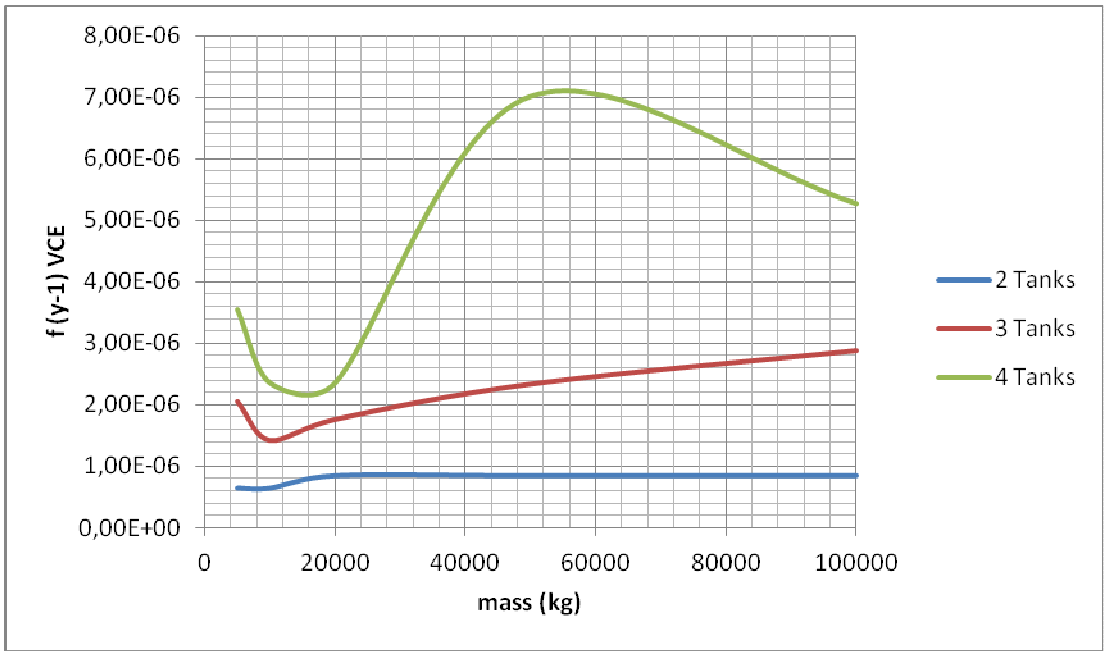


Figura 6.3.2.b. Valors de les freqüències finals de UVCE en funció de la massa emmagatzemada

A la figura superior s'observa com igual que en el cas de la BLEVE, també s'observa que la corba presenta una freqüència major pel cas de 5.000 kg que per 10.000 i 20.000 kg per posteriorment augmentar.

En el cas de les UVCE generades per una pèrdua instantània s'observa que per a la instal·lació de 4 tancs, a diferència de la de 2 i 3, la corba presenta un màxim a 50.000 kg, com a conseqüència de la irregularitat exposada.

Tot i això, s'observa clarament que la freqüència d'ocurrència és proporcional al nombre de tancs existents a la instal·lació i, per tant, a major nombre de tancs, major freqüència.

6.3.3. *Flash Fire* generat per una pèrdua instantània del inventari

Seguint amb els accidents generats per pèrdues instantànies del inventari, analitzarem el cas del Flash Fire. Les seves figures són els següents:

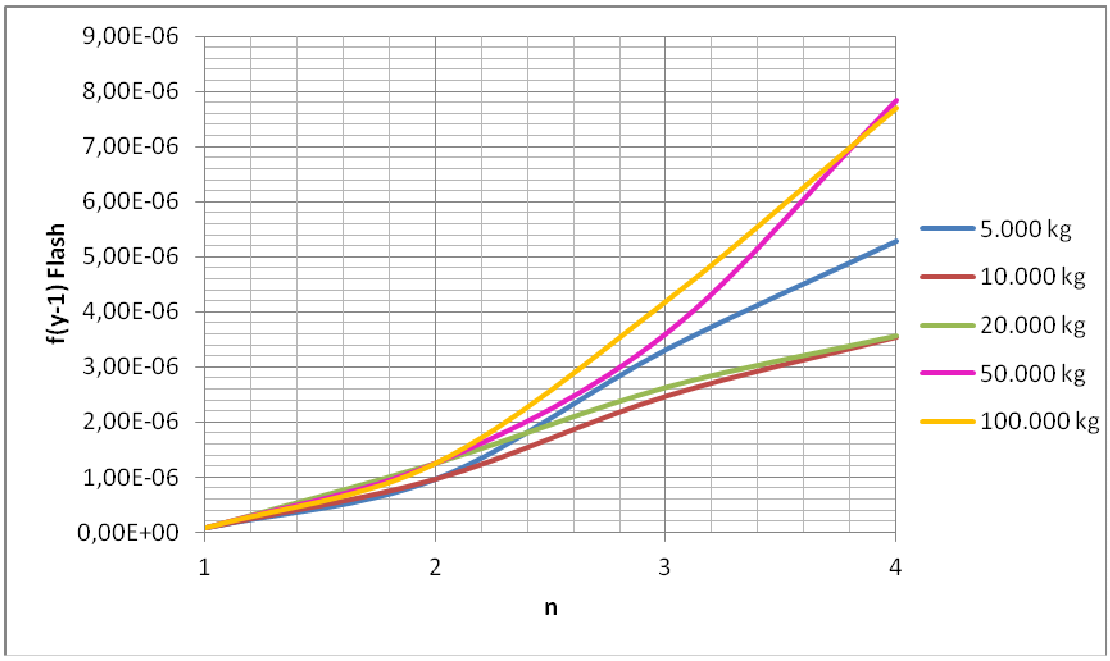


Figura 6.3.3.a. Valors de les freqüències finals de Flash Fire en funció del nombre de tancs.

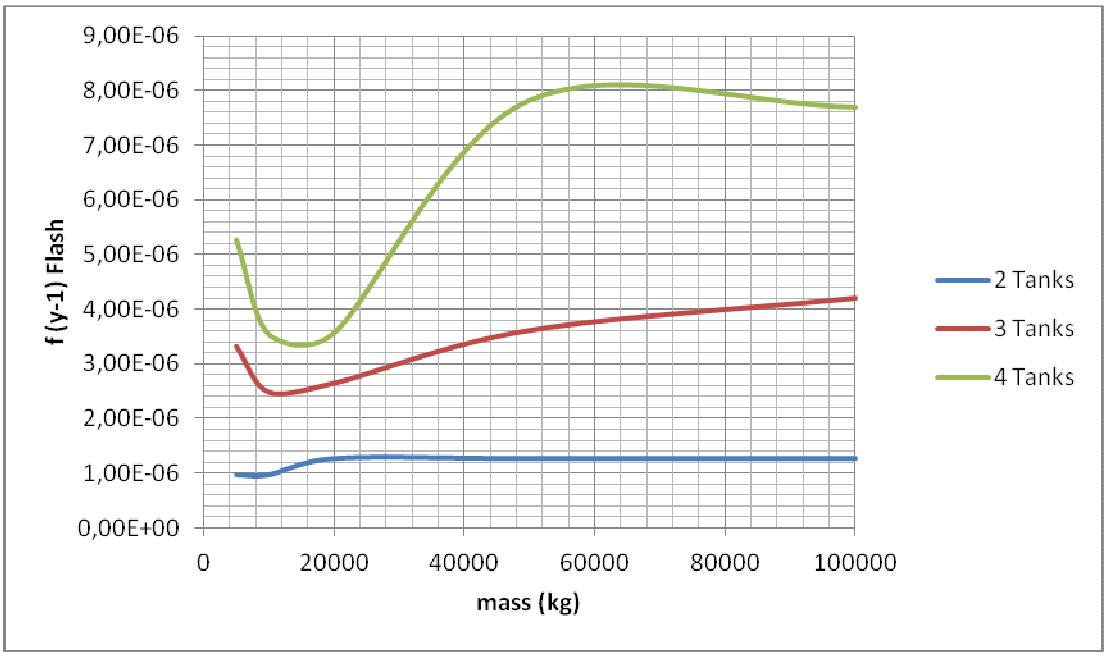


Figura 6.3.3.b. Valors de les freqüències finals de Flash Fire en funció de la massa emmagatzemada

En aquest cas s'observa el mateix comportament que en els casos anteriors:

Les corbes tenen una tendència potencial i a la figura 6.3.3.a s'observen les dues mateixes irregularitats que en els casos anteriors, tot i que en aquest cas la diferència entre la instal·lació de 4 tancs amb 50.000 i 100.000 kg és de només $1{,}3 \cdot 10^{-7}$.

Pel que fa a l'anàlisi en funció de la massa, s'observa que la freqüència és directament proporcional al nombre de tancs existents a la instal·lació. Les corbes presenten un mínim per a quantitats entre 10.000 i 20.000 kg i posteriorment, augmenten.

6.3.4. *Pool Fire* per a una pèrdua instantània del inventari

Les corbes referents als resultats obtinguts per al Pool Fire generat per una pèrdua instantània del inventari són les següents:

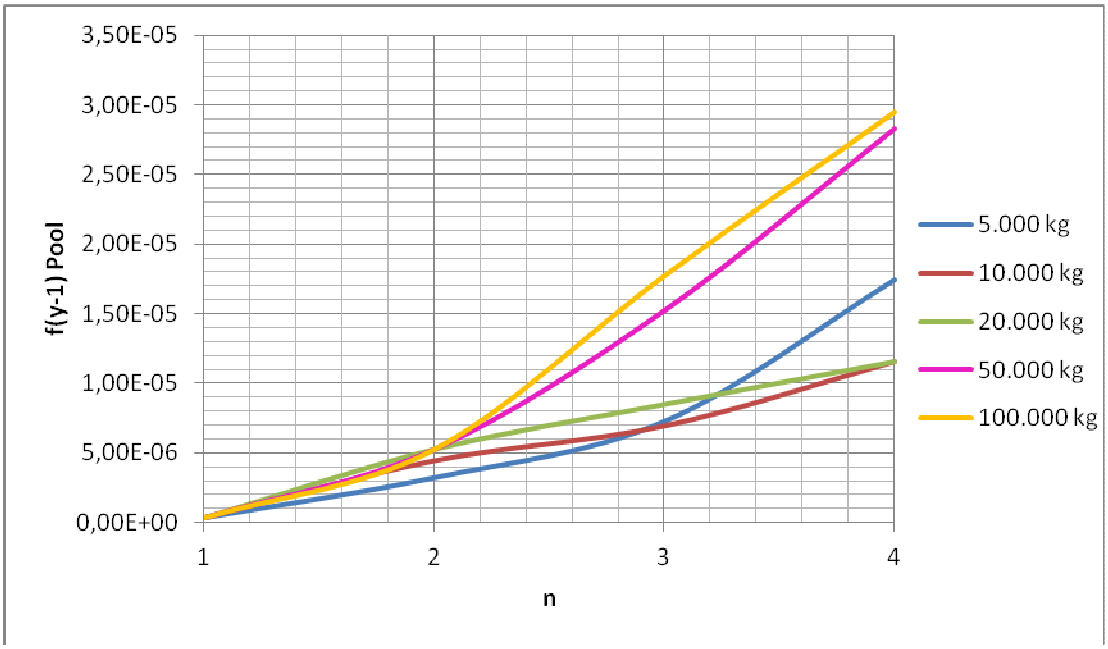


Figura 6.3.4.a. Valors de les freqüències finals de Pool Fire en funció del nombre de tancs

Observant la figura 6.3.4.a, la única incongruència que a primera vista crida l'atenció és el fet que la corba de 5.000 kg obtingui un valor superior a les corbes de 10.000 kg i 20.000 kg.

Com em pogut comprovar a la resta de gràfiques que mostren la freqüència de successos de pèrdua instantània del contingut aquest fet és comú a totes elles.

Igual que a la resta dels casos, l'explicació per aquest fet és que en instal·lacions amb 5.000 kg de GLP, la NFPA 58 marca que la distància mínima entre tancs ha de ser de 1 metre, mentre que en els altres dos casos ha de ser d'1,5 metres.

Aquest augment de la distància provoca que els efectes catastròfics als tancs adjacents proliferin en el cas de la instal·lació de 5.000 kg i que en les instal·lacions de 10.000 i 20.000 kg donin pas a efectes G.2. en els tancs adjacents (com es podrà comprovar a les corbes corresponents a l'apartat en qüestió).

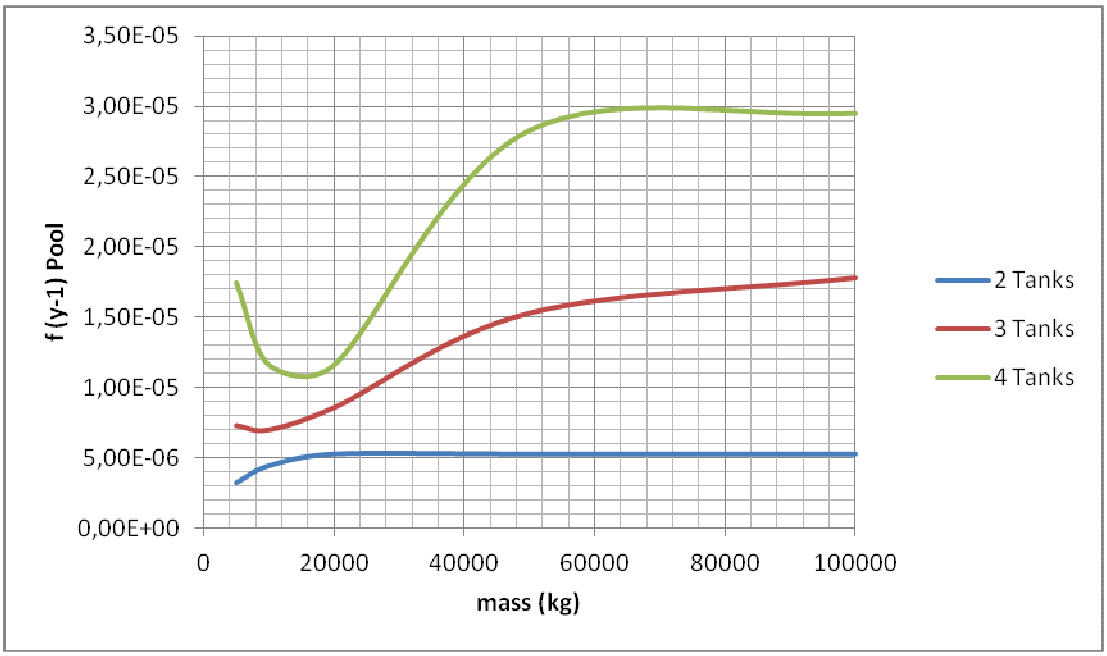


Figura 6.3.4.b. Valors de les freqüències finals de Pool Fire en funció de la massa emmagatzemada

En aquesta figura s'observa el mateix comportament que en els casos anteriors, una relació directa entre la freqüència i el nombre de tancs i un mínim per a les instal·lacions de 10.000 i 20.000 kg.

6.3.5. *Jet Fire* generat per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts

Donada la naturalesa de la BLEVE, aquesta només es pot donar quan la pèrdua del inventari és instantània. En el cas del *Jet Fire* succeeix el contrari, tan sols es pot donar en situacions on la pèrdua del inventari és continua, per això en aquests casos estudiarem el *Jet Fire* enlloc de la BLEVE.

Les corbes obtingudes són les següents:

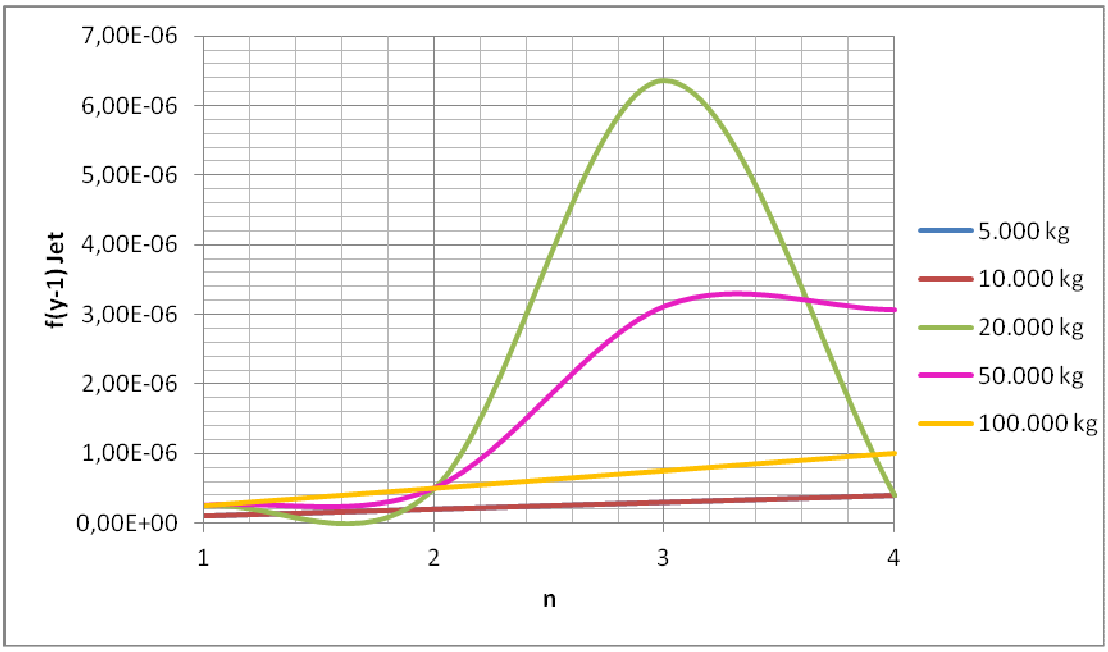


Figura 6.3.5.a. Valors de les freqüències finals de Jet Fire en funció del nombre de tancs

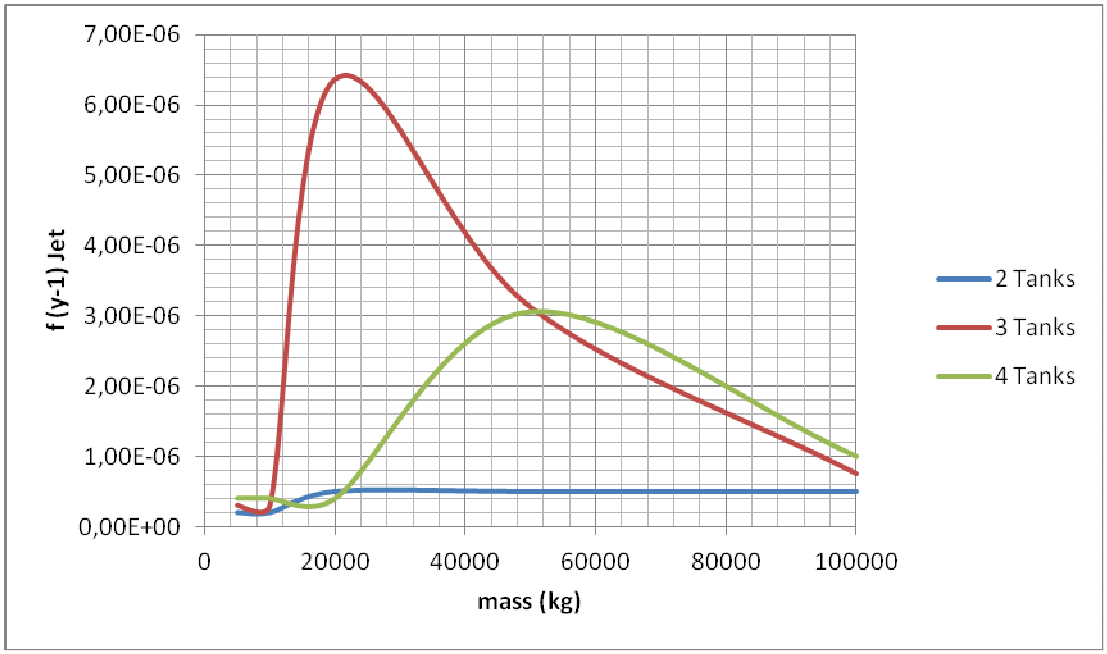


Figura 6.3.5.b. Valors de les freqüències finals de Jet Fire en funció de la massa emmagatzemada

A diferència del accidents en el què el succés iniciador era una pèrdua instantània del inventari, en el cas en que el succés iniciador és una pèrdua continua del inventari durant 10 minuts el comportament de les corbes no segueix una tendència en totes elles, presentant rectes i corbes amb màxims molt marcats.

Les corbes corresponents a 5.000, 10.000 (sobreposades) i 100.000 kg són corbes amb tendència lineal amb freqüències d'ocurrència relativament baixes i que gairebé no creixen a mesura que s'incrementa el nombre de tancs que formen la instal·lació.

El comportament de les corbes corresponents a 20.000 i 50.000 kg és totalment contrari, presentat un màxim en les instal·lacions amb 3 tancs per després tornar a reduir la freqüència.

És interessant recorda que en el projecte, alhora de quantificar la freqüència d'ocurrència d'una tipologia d'accident a una instal·lació s'han tingut en compte els resultats obtinguts a totes les explotacions realitzades d'una mateixa instal·lació fos quin fos el succés iniciador. És per aquest motiu que alhora d'analitzar un esdeveniment no es pot analitzar sense tenir en compte la resta d'esdeveniments, així que haurem de tenir en compte les corbes referents a les pèrdues instantànies del contingut per analitzar aquestes.

El fet que la corba de 100.000 kg presenti valors inferiors a les corbes de 20.000 i 50.000 kg és degut al fet que amb una instal·lació de 100.000 kg i 4, la quantitat emmagatzemada a cada tanc és prou gran per provocar danys catastròfics a la resta de tancs quan aquesta pateixi algun tipus d'accident. Generant danys catastròfics es provoquen pèrdues instantànies del inventari als tancs afectats per l'efecte dominó, de manera que la freqüència d'aquests esdeveniments es reflexa a les gràfiques corresponents al punt anterior.

Un altre comportament que s'han d'analitzar és el fet que la corba de 20.000 kg presenta un clar màxim quan la instal·lació està formada per 3 tancs. Revisant els arbres realitzats a partir de la informació proporcionada pel model, aquest màxim ve causat per l'efecte dominó del *Pool Fire*.

Pel que s'observa als arbres d'esdeveniments, el Pool causat per la fallada d'un tanc que emmagatzema 3.333 kg de propà (instal·lació de 10.000 kg) no causa fallades en els tancs adjacents, de la mateixa manera que tampoc ho fa el Pool esdevingut per un del 3 tancs que emmagatzemen 5.000 kg en total. Paral·lelament, els Pools causats per tancs que pertanyen a instal·lacions de 50.000 kg i 100.000 kg sí que provoquen pèrdues del contingut als altres tancs, però els danys causats provoquen que aquesta pèrdua es doni de forma instantània enlloc de ser en forma de una pèrdua continua durant 10 minuts.

6.3.6. UVCE generada per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts

Les corbes 6.3.6.a i 6.3.6.b mostren les freqüències derivades de la UVCE causada per la pèrdua continua del inventari durant 10 minuts:

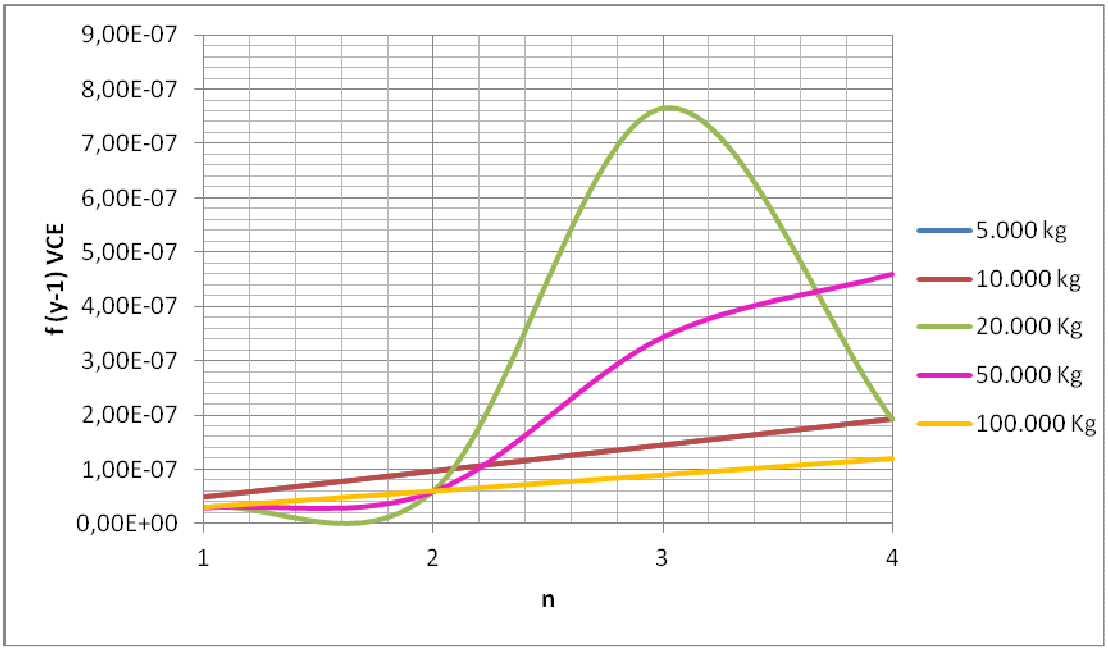


Figura 6.3.6.a. Valors de les freqüències finals de UVCE en funció del nombre de tancs

Aquestes gràfiques presenten unes característiques semblants a les del cas anterior, i, per tant, l'anàlisi realitzada de les irregularitats observades pel *Jet Fire* també és vàlida per aquest cas, tot i això és interessant destacar perquè hi ha corbes en aquestes gràfiques amb una marcada tendència lineal i altres que presentes màxims

A les gràfiques observem que les corbes corresponents a instal·lacions de 5.000, 10.000 i 100.000 kg són rectes mentre que les de 20.000 i 50.000 kg són corbes. Aquesta situació és conseqüència que els efectes dels accidents de tancs amb una quantitat petita de GLP (instal·lacions de 5.000 i 10.000 kg) no són prou severs com per afecta als tancs veïns, afectant tan sols al tanc immediat i, sovint de manera catastròfica. Pel que fa a les instal·lacions amb 100.000 kg, a partir dels arbres d'esdeveniments s'observa que gairebé tots els accidents que pateixen els tancs a causa de l'efecte dominó impliquen una pèrdua instantània del inventari degut a la severitat dels efectes del succés iniciador. D'aquesta manera, les instal·lacions corresponents a 5.000, 10.000 i 100.000 kg tan sols veuen

incrementada la freqüència degut a l'augment del nombre de tancs, i, per tant, de tancs que poden experimentar l'accident com a succés iniciador, i no a causa de l'efecte dominó.

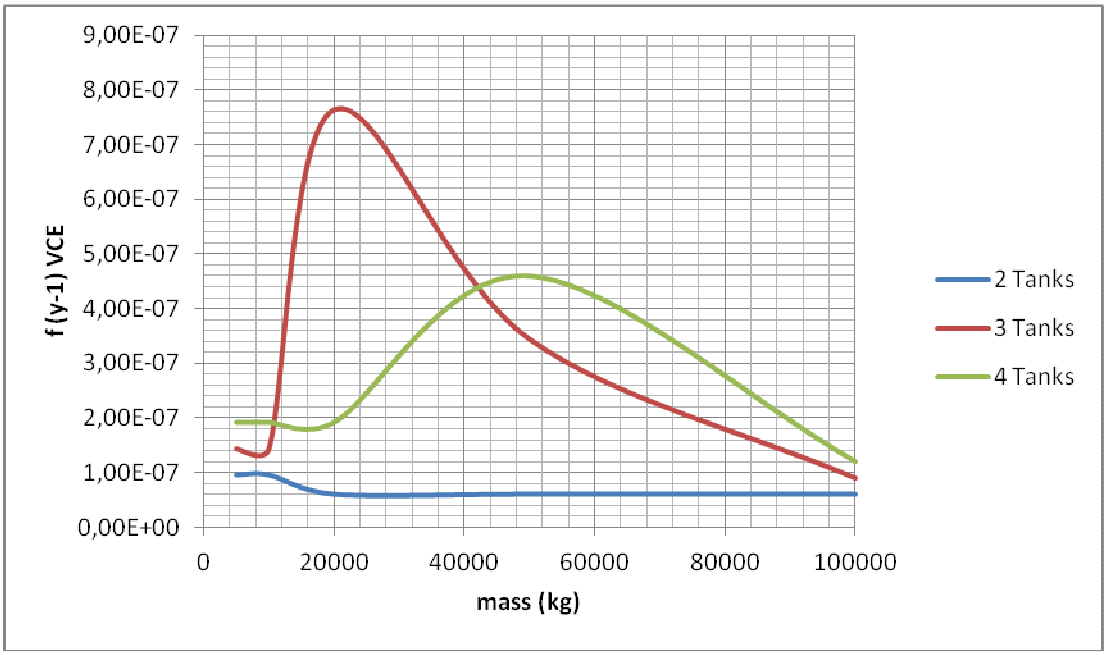


Figura 6.3.6.b. Valors de les freqüències finals de UVCE en funció de la massa emmagatzemada

Aquest fet, per una banda dóna explicació al fet que hi hagi rectes i corbes i per l'altre banda explica que la freqüència d'ocurrència dels accidents amb una pèrdua instantània sí es vegi un incrementada exponencialment, no essent així pels accidents amb una pèrdua continua del inventari.

6.3.7. Flash Fire generat per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts

A continuació es mostren les figures corresponents a les freqüències d'ocurrència d'un *Flash Fire* generat com a conseqüència d'un esdeveniment en el qual la pèrdua del inventari s'hagi produït de manera continuada durant 10 minuts en una instal·lació d'emmagatzematge de GLP.

Les gràfiques obtingudes a partir de les dades reportades pel model desenvolupat són, en lo referent a la forma, idèntiques a les del cas en UVCE anterior, i per tant l'anàlisi

realitzada en els punts 6.3.5 i 6.3.6 és vàlida per a les gràfiques que es mostraran a continuació

La diferència entre les gràfiques corresponents a la UVCE i al Flash Fire esdevé únicament en els valors de la freqüència. Això es deu a què el model realitzat està basta en la informació expressada en el Purple Book [5], i, per tant, la probabilitat que es doni un *Flash Fire* enlloc d'una explosió del núvol de vapor, com a conseqüència d'un succés iniciador, és més gran.

Les gràfiques són les següents:

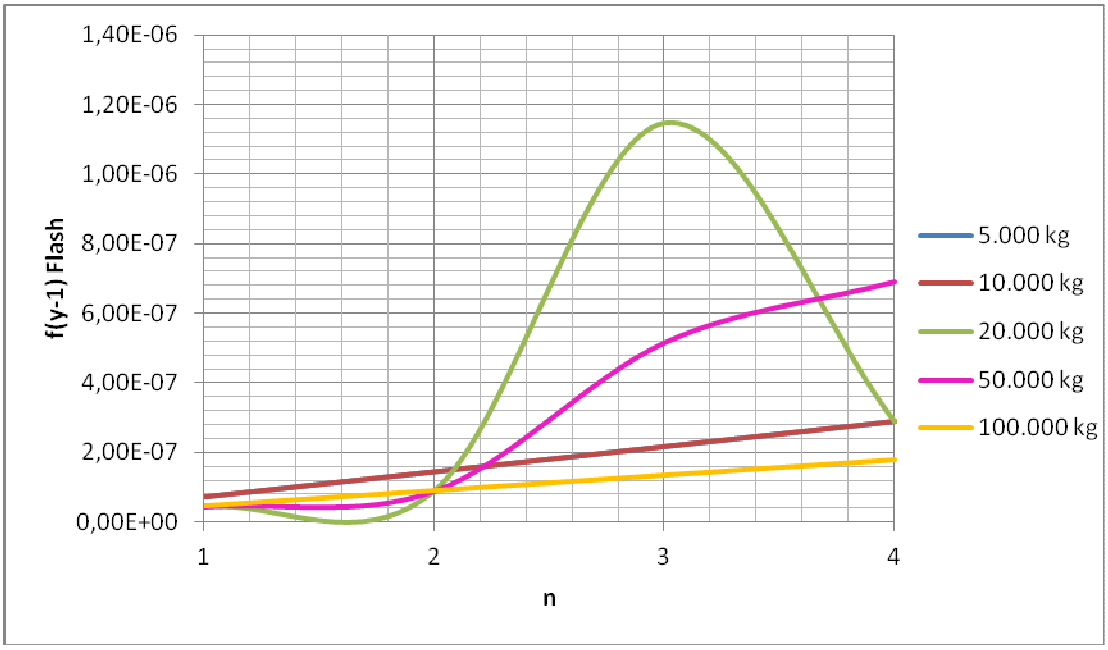


Figura 6.3.7.a. Valors de les freqüències finals de Flash Fire en funció del nombre de tancs

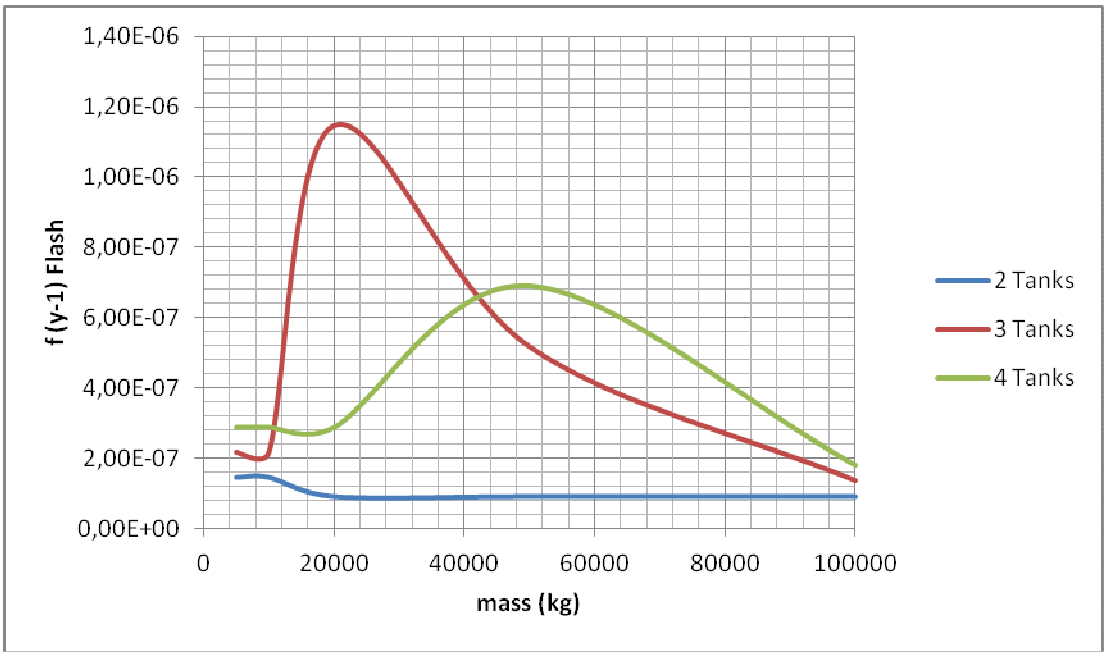


Figura 6.3.7.b. Valors de les freqüències finals de Flash Fire en funció de la massa emmagatzemada

6.3.8. Pool Fire generat per una pèrdua continua del inventari complet durant 10 minuts

Com a últim esdeveniment estudiat com a conseqüències d'esdeveniments G.2 es té el Pool Fire. A continuació es mostren les seves gràfiques.

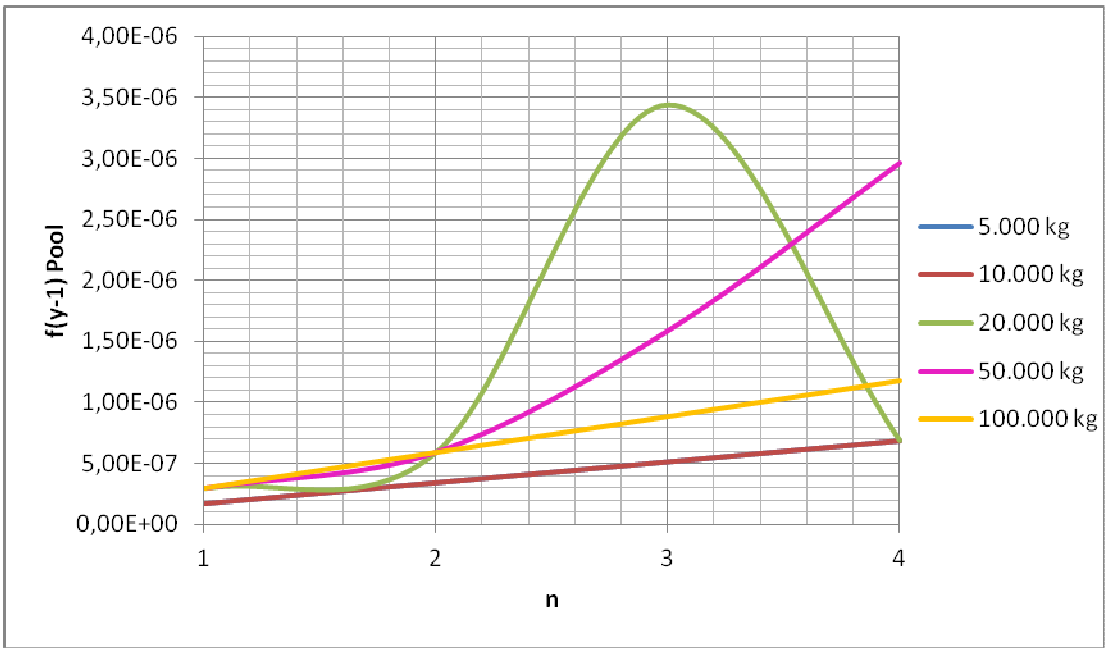


Figura 6.3.8.a. Valors de les freqüències finals de Pool Fire en funció del nombre de tancs

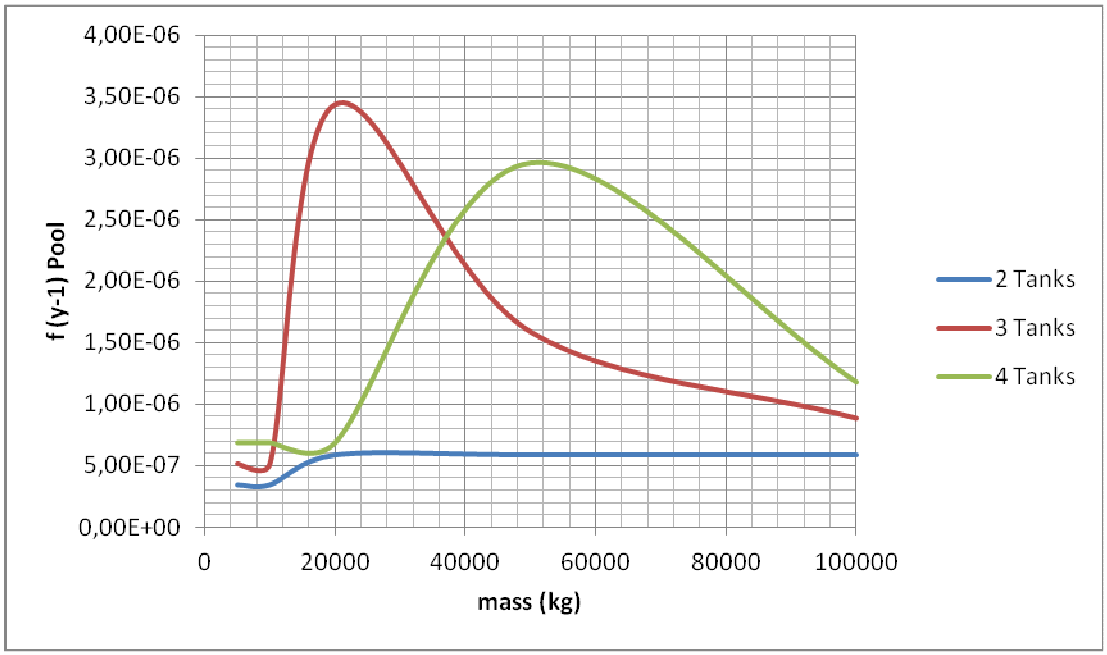


Figura 6.3.8.b. Valors de les freqüències finals de Pool Fire en funció de la massa emmagatzemada

Es pot observar que el tipus de figura obtinguda és el mateix que en els 3 casos anteriors, seguint la tendència mostrada en tots le figures previes d'esdeveniments G.2. Tot i això, salta a la vista la forma de la corba corresponent a 50.000 kg (color rosa) que mostra la figura 6.3.8.a.

En cap de les figures corresponents a accidents G.2 s'ha observat un comportament exponencial.

6.3.9. Jet Fire generat per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre

En la darrera de les categories de pèrdua del inventari dels accidents es troben els esdeveniments en els quals la pèrdua del inventari pot ser o no completa però sempre es deu a forat de 10 mm de diàmetre. Pel cas dels Jet Fire les figures són els següents:

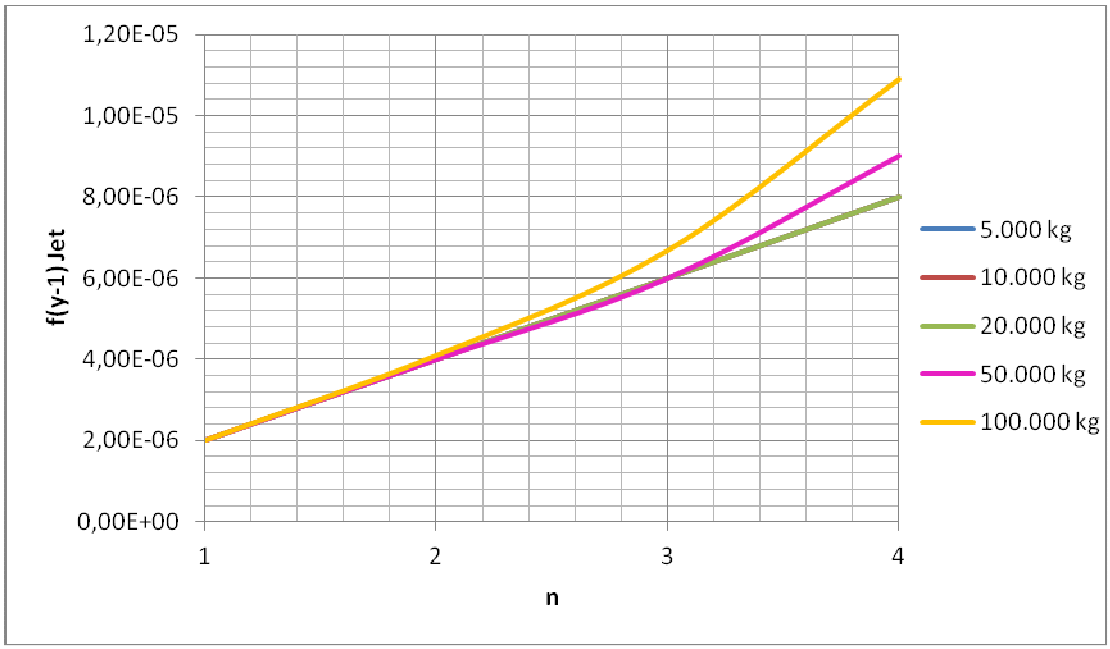


Figura 6.3.9.a. Valors de les freqüències finals de Jet Fire en funció del nombre de tancs

Al gràfc s'observa que en el cas dels esdeveniments G.3 la tendència torna a ser exponencial a mesura que s'incrementa la quantitat de matèria involucrada en la instal·lació, mantenint una tendència lineal per als casos de 5.000, 10.000 i 20.000 kg. Tot i que l'increment de la freqüència experimenta una progressió molt més lenta que en els accidents generats a partir d'una pèrdua instantània del inventari.

S'observa que per al cas d'instal·lacions de 5.000, 10.000 i 20.000 kg no hi ha hagut accidents que per efecte dominó hagin generat un esdeveniment G.3, de manera que la freqüència augmenta linealment a causa del increment del nombre de tancs i, per tant, multiplica la freqüència del succés iniciador.

En el cas de la corba de 50.000 es pot comprovar que aquesta segueix la mateixa tendència lineal que les corresponents a instal·lacions amb menor quantitat emmagatzemada, però que en el cas concret de la instal·lació amb 4 tancs, a més dels efectes catastròfics en els tancs més propers, hi ha un efecte sobre els tancs més allunyats que provoca esdeveniments G.3. És per això que la corba experimenta un lleuger increment a la part final d'aquesta.

Pel que fa a la corba de 100.000 kg s'observa que els successos iniciadors originats ja tenen suficient força per afectar no tan sols als tancs contigus sinó als de més enllà. És per aquest motiu que la corba de 100.000 kg experimenta un increment major de la freqüència que la corba de 50.000 kg.

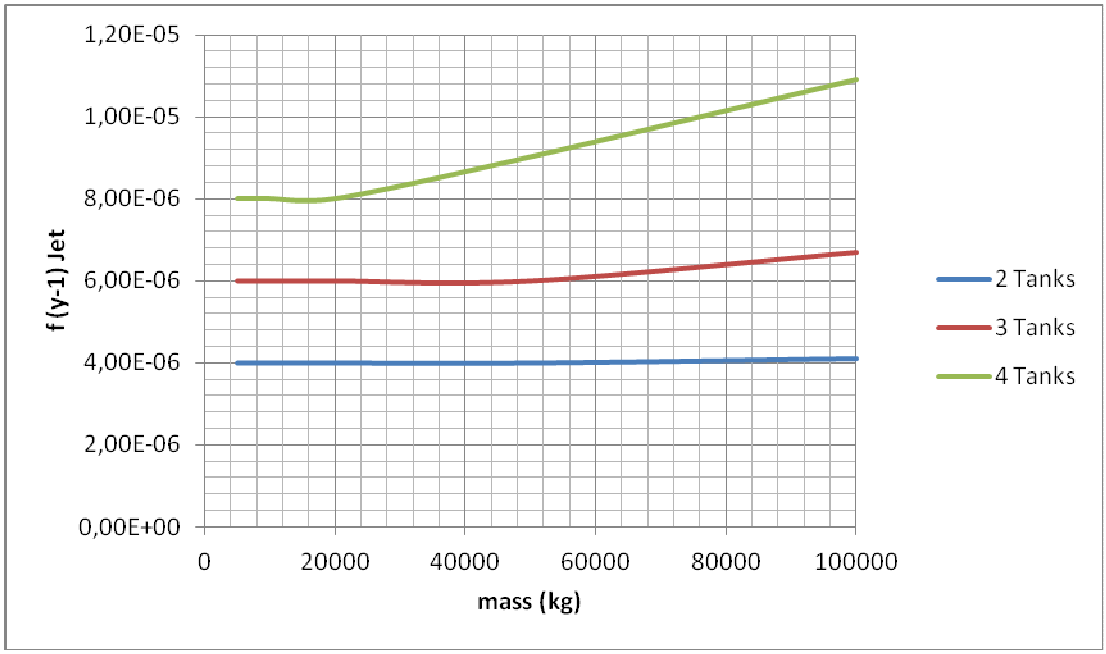


Figura 6.3.9.b. Valors de les freqüències finals de Jet Fire en funció de la massa emmagatzemada

En aquesta figura es pot observar que les 3 corbes mantenen un comportament similar. La freqüència de la que parteix cada corba és superior a l'anterior degut a què, pel cas de 5.000 kg, en no haver efecte dominó que generi esdeveniments G.3, la freqüència del succés iniciador es multiplica pel nombre de tancs existents a la instal·lació. Paral·lelament s'observa com per a les instal·lacions amb 3 i 4 tancs, a partir de 50.000 kg la freqüència

deixa de tenir un comportament lineal i passa a experimenta un cert increment amb tendència exponencial.

6.3.10. UVCE generada per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre

Tot seguit es mostren les figures corresponents a les explosions d'un núvol de vapor no confinades generades a partir d'un esdeveniment G.3. En aquestes figures es podrà observar que la tendència comentada pel cas anterior també es manté per aquesta tipologia d'accident.

La única diferència entre les figures anteriors i els que es mostraran a continuació és els valors de les freqüències ja que, tal i com s'ha comentat anteriorment, cada un dels efectes d'un accident té una probabilitat d'ocórrer, de manera que davant d'una mateixa probabilitat del succés iniciador cada un dels efectes d'aquest té una probabilitat d'ocurrència diferent.

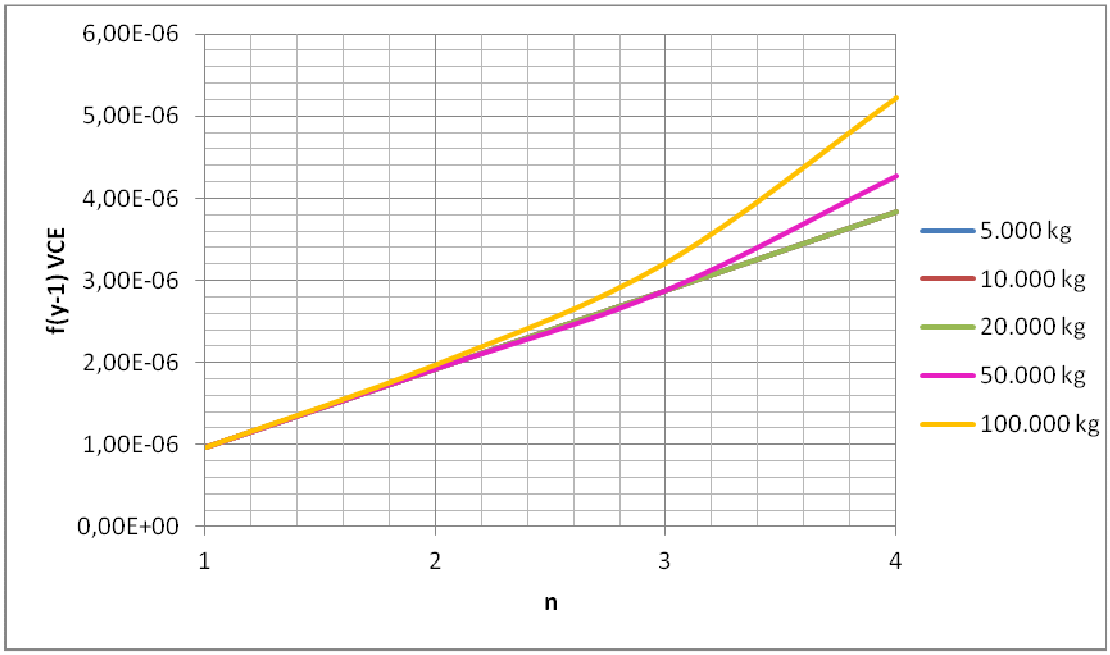


Figura 6.3.10.a. Valors de les freqüències finals de UVCE en funció del nombre de tancs

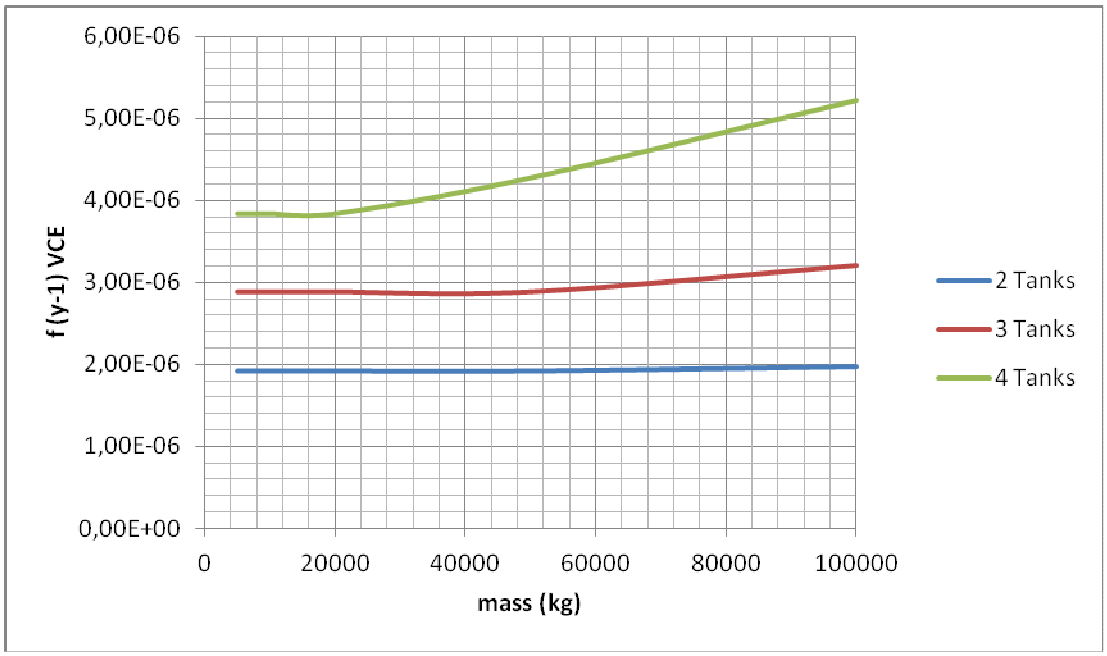


Figura 6.3.10.b. Valors de les freqüències finals de UVCE en funció de la massa emmagatzemada

6.3.11. Flash Fire generat per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre

En les figures dels resultats corresponents al *Flash Fire* a causa d'una pèrdua del contingut de la tipologia G.3 segons el Purple Book [5] es pot comprovar que la tendència descrita en els dos punts anteriors es manté completament. Les figures són els següents:

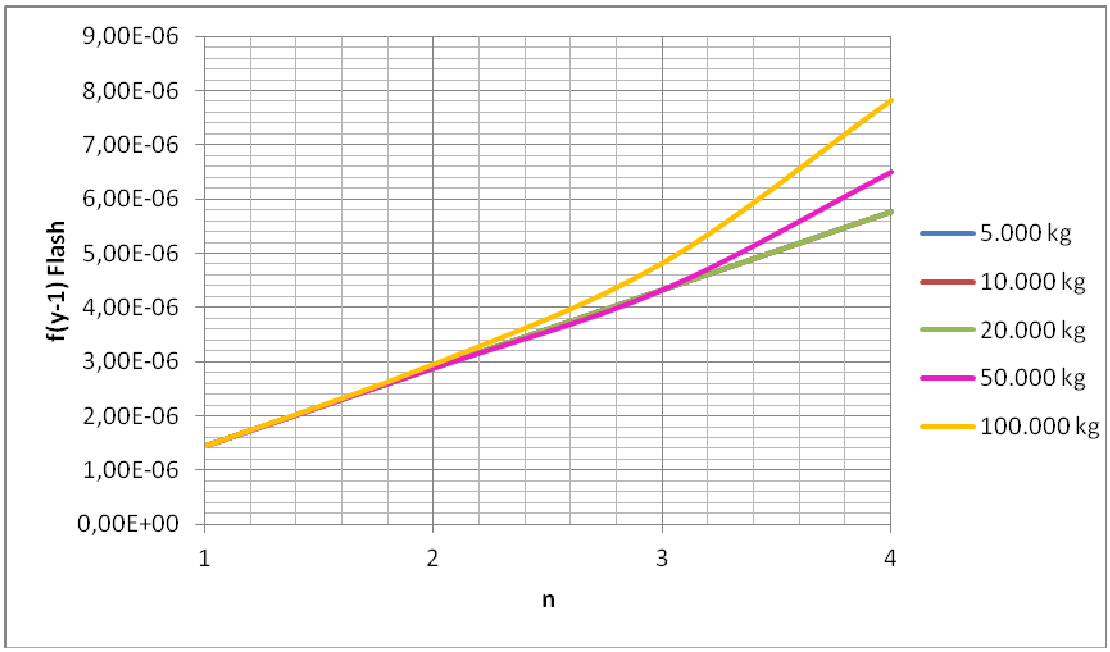


Figura 6.3.11.a. Valors de les freqüències finals de Flash Fire en funció del nombre de tancs

Pel que fa a la figura que mostra la relació de la freqüència amb la massa involucrada a la instal·lació, es podrà observa que lògicament aquest també manté la mateixa tendència que la resta de figures que analitzen aquesta tipologia de succés iniciador.

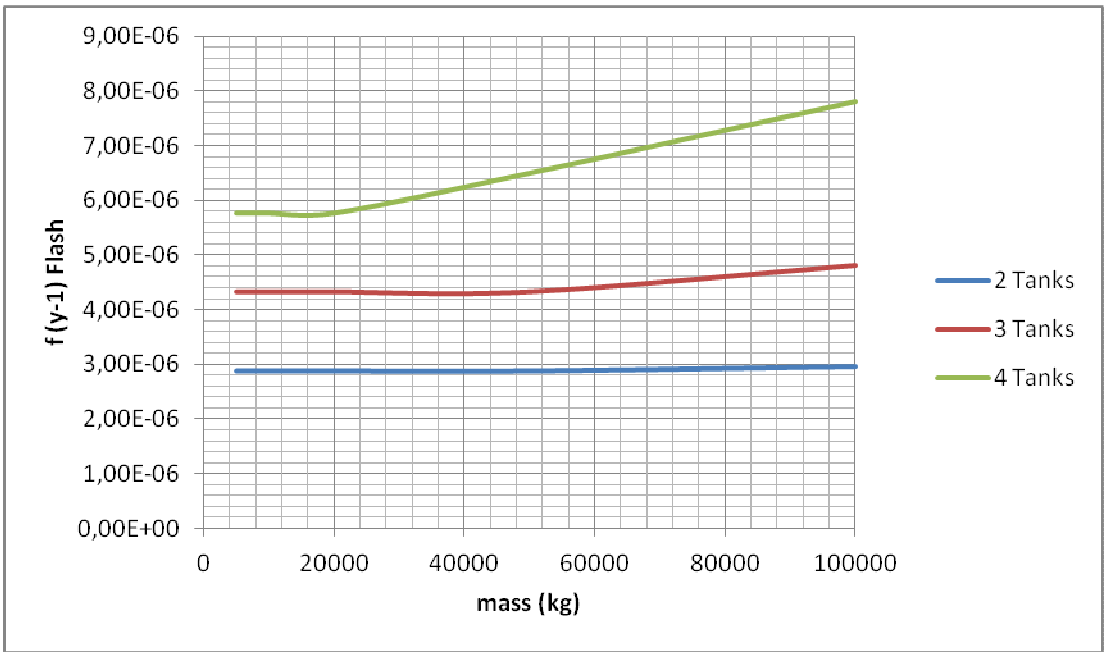


Figura 6.3.11.b. Valors de les freqüències finals de Flash Fire en funció de la massa emmagatzema.

6.3.12. Pool Fire generat per una pèrdua continua del inventari per un forat de 10 mm de diàmetre

Per últim es presenten les gràfiques corresponents al *Pool Fire* a causa d'una pèrdua d'inventari a partir d'un forat de 10 mm de diàmetre.

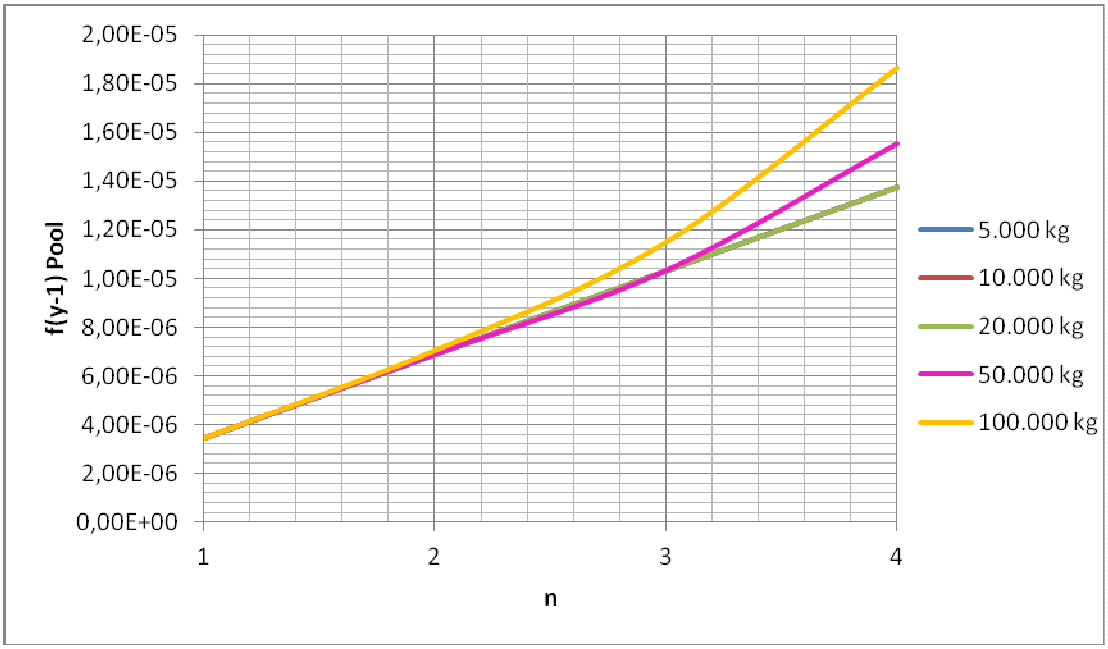


Figura 6.3.12.a. Valors de les freqüències finals de Pool Fire en funció del nombre de tancs

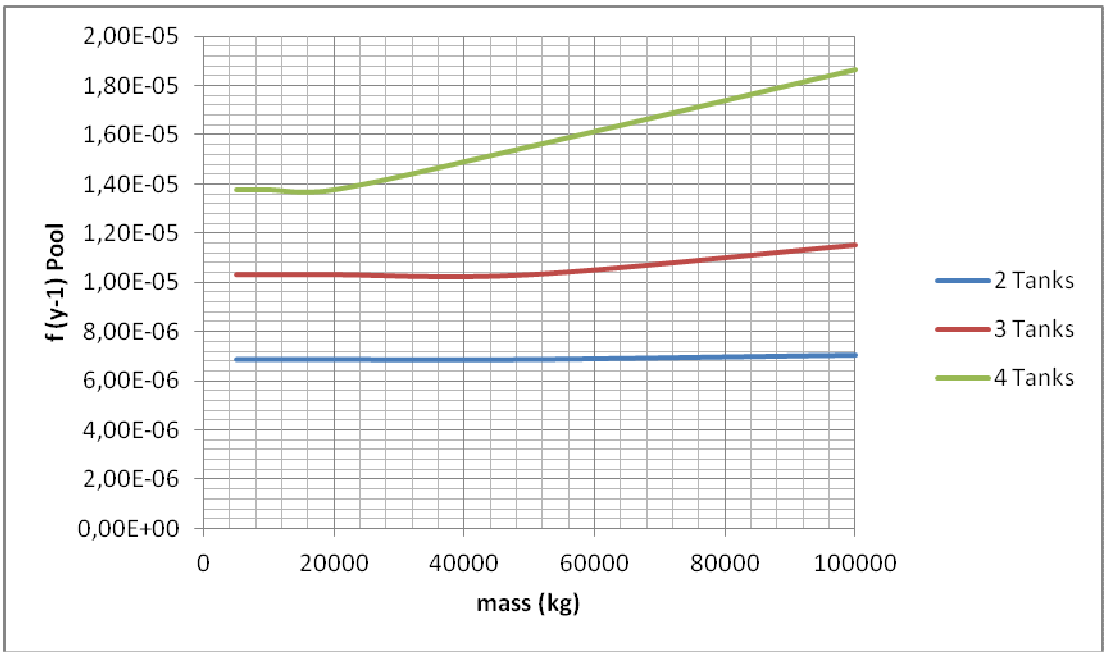


Figura 6.3.12.b. Valors de les freqüències finals de Pool Fire en funció de la massa emmagatzema.

6.4. Conclusions

En aquest punt es comentaran les conclusions extretes després de realitzar les 75 explotacions del model dissenyat. Es considera adient realitzar una subdivisió d'aquestes, separant les conclusions referents a la metodologia emprada a les AQR i les conclusions referents als resultats extrets a partir de la metodologia dissenyada en aquest projecte.

6.4.1. Conclusions referents a la metodologia emprada a l'AQR

En haver realitzat la comparativa dels resultats obtinguts segons la metodologia del projecte i la metodologia emprada en la realització de les AQR s'extreuen les següents conclusions:

1 - En totes les tipologies d'esdeveniments estudiades s'observen diferències importants en els valors de la freqüència resultant, donant-se el cas en què aquesta diferència arribar a ser de més d'un ordre de magnitud

2 - En els accidents conseqüència d'una pèrdua instantània del inventari, segons la metodologia emprada a l'AQR, l'augment de la freqüència és lineal, donat que la freqüència d'un iniciador que pot provocar ED s'agreuja amb un factor multiplicador igual a 2 i amb el

nombre de tancs que formen la instal·lació. Amb els resultats obtingut per aquest tipus d'esdeveniments s'ha pogut comprovar que l'augment que experimenta aquests successos és exponencial i no lineal.

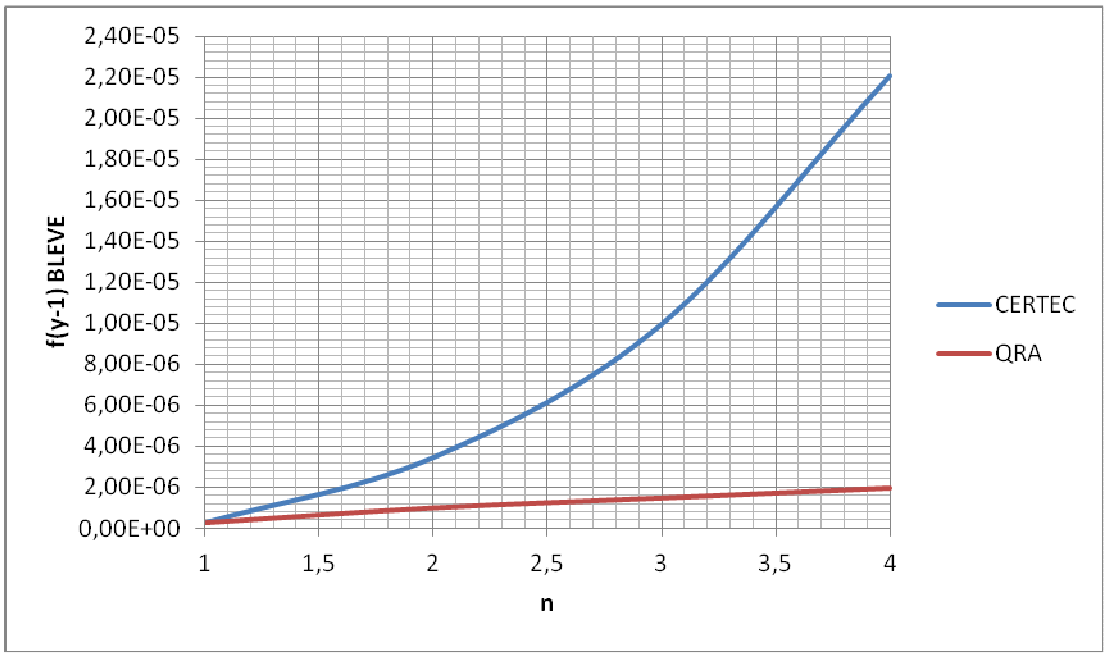


Figura 6.4.a. Comparació de la freqüència per a l'accident final BLEVE degut a l'iniciador G.1. entre el model i el criteri aplicat per normativa AQR per una instal·lació de 50.000 kg.

A mode d'exemple d'accident a causa d'una pèrdua instantània s'ha escollit la figura superior on es comprova que concretament en el cas de la BLEVE existeix una clara diferència entre les tendències que segueixen les dues corbes, exponencial i lineal respectivament, del que es dedueix que quan major sigui el nombre de tancs presents a la instal·lació la diferència entre els resultats obtinguts amb les dues metodologies el error comès, en base al model emprat en el present projecte, augmenta exponencialment. Aquest error repercuteix en el càlcul del Risc Individual i el Risc Social propiciant la generació de corbes d'isorisc i de la corba F-N amb grans desviacions degut a dades incorrectes.

3 - En els accidents provocats a causa d'una pèrdua continua durant 10 minuts, s'ha observat que la freqüència resultant amb la metodologia AQR és superior a la del model dissenyat en els casos en què la freqüència obtinguda augmenta linealment, és a dir, per a instal·lacions que emmagatzemen 5.000, 10.000 i 100.000 kg, essent la diferència de més d'un ordre de magnitud en el cas del *Pool Fire*. Tot i això, i donat que amb la metodologia AQR la freqüència creix linealment, en el cas d'instal·lacions amb 20.000 i 50.000 kg de GLP, aquesta tendència s'inverteix donant per resultat freqüències majors amb la

metodologia del projecte en tots els casos. Ambdues situacions es mostren a continuació amb les figures corresponents.

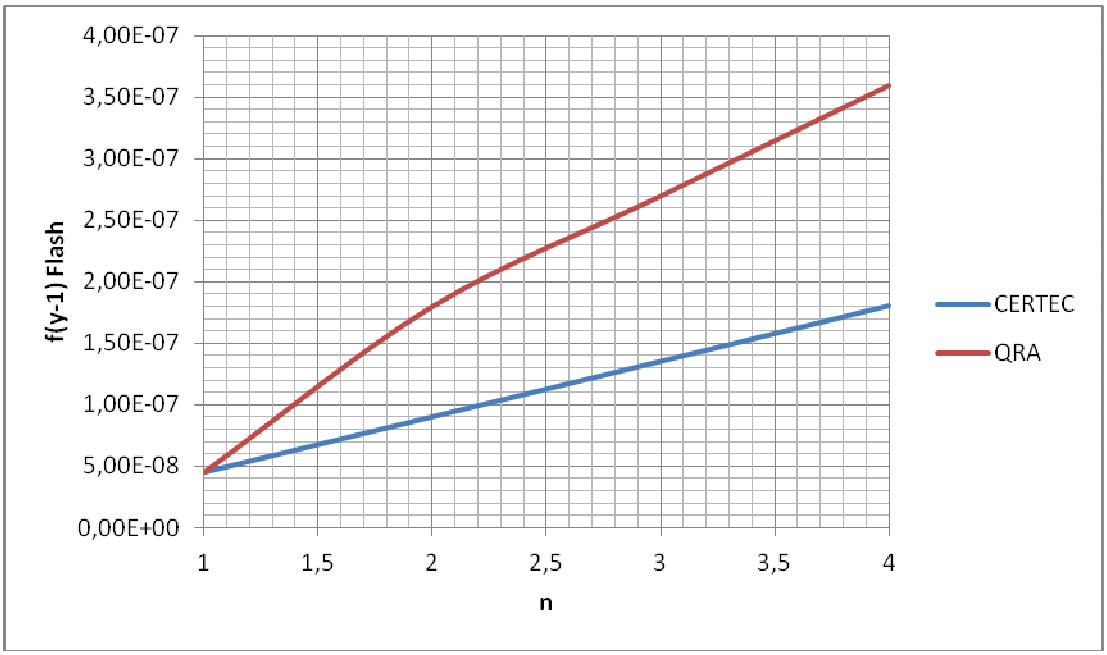


Figura 6.4.b. Comparació de la freqüència per a l'accident final Flash Fire degut a l'iniciador G.2. entre el model i el criteri aplicar per normativa AQR per una instal·lació de 100.000 kg.

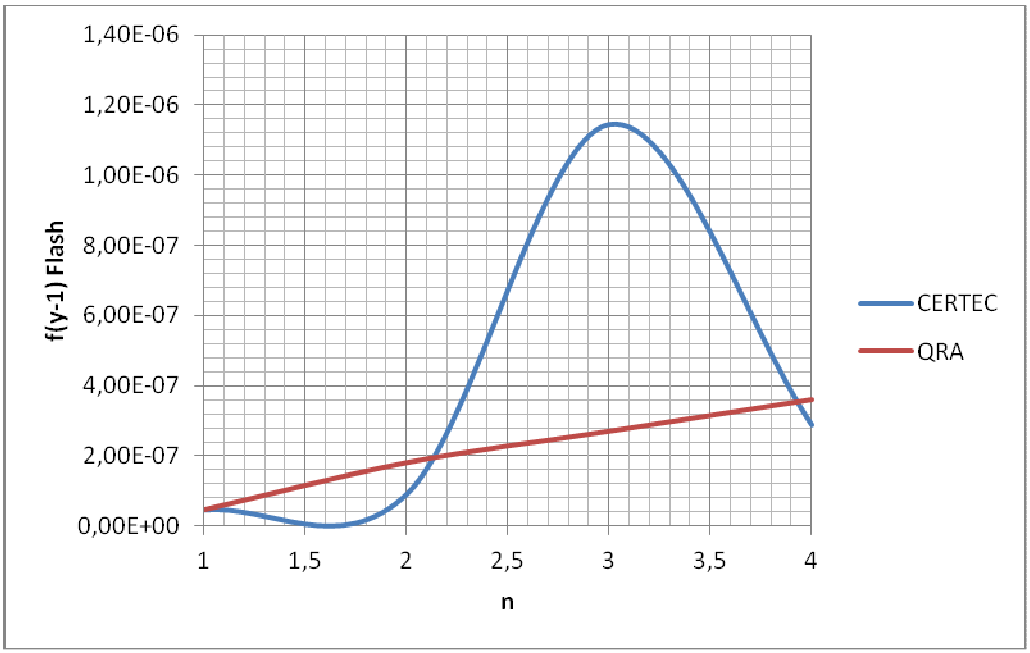


Figura 6.4.c. Comparació de la freqüència per a l'accident final Flash Fire degut a l'iniciador G.2. entre el model i el criteri aplicar per normativa AQR per una instal·lació de 20.000 kg.

4 - En els accidents a causa d'una pèrdua del inventari per un forat de 10 m de diàmetre, s'observa que en tots els casos la freqüència obtinguda amb la metodologia AQR és superior a la metodologia pròpia del projecte, tot i que l'augment de la freqüència en el cas de l'AQR no és superior al 50% de la freqüència obtinguda amb el model.

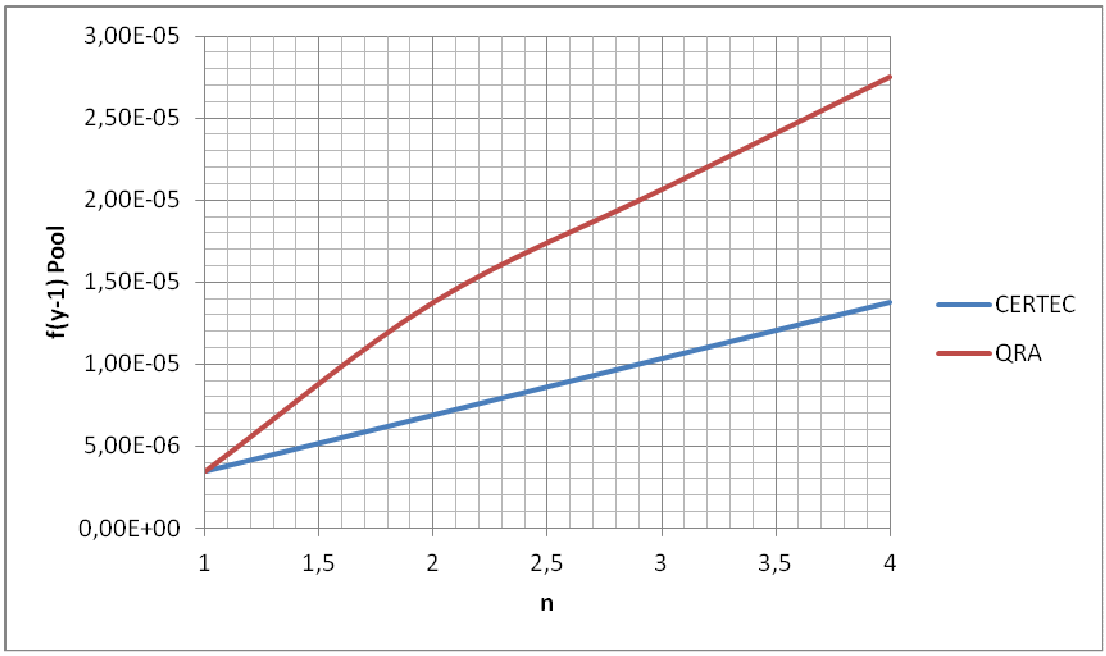


Figura 6.4.d. Comparació de la freqüència per a l'accident final Pool Fire degut a l'iniciador G.3 entre el model i la normativa AQR per a una instal·lació de 10.000 kg.

Per tant, i com a conclusió principal d'aquest punt, en tots els casos s'han observat diferències entre les dues metodologies per a l'anàlisi i inclusió de l'ED en el càlcul de la freqüència d'ocurrència, donant-se la situació que en gairebé el 50 % del casos la freqüència resultat en l'AQR és inferior a la freqüència d'ocurrència que possiblement correspongui a l'esdeveniment. És per això que en base als resultats obtinguts es determina que l'aproximació proposada en la metodologia emprada en l'AQR no és suficientment realista en el 100% dels casos i per tant s'hauria de prendre mesures respecte aquesta.

6.4.2. Conclusions referents a l'anàlisi dels resultats obtinguts amb la metodologia dissenyada per al projecte

Després d'haver realitzat l'anàlisi dels resultats obtinguts a partir del model es poden extreure diverses conclusions:

1. Tal i com es sospitava, el comportament de tots els efectes que provoca cada una de les tipologies de succés és pràcticament idèntic en els 3 casos.

2 - En cas d'emmagatzemar GLPs, la freqüència de LOC G.1 creix exponencialment amb el nombre de tancs i creix linealment des de 10.000 a 50.000 kg quan la instal·lació conté més de 3 tancs, presentant la major freqüència en el cas d'una instal·lació que alberga 50.000 kg en 4 tancs.

3 - La freqüència de LOC G.2 creix linealment amb el nombre de tancs per a instal·lacions que alberguen una massa inferior a 10.000 kg i superior a 50.000 kg. En aquest interval la freqüència experimenta una tendència gaussiana en el cas de 20.000 kg. Respecte a la dependència amb la massa, s'observa una relació gaussiana entre les dues variables en instal·lacions amb més de 3 tancs. El punt amb una freqüència major correspon a una instal·lació de 20.000 kg en 3 tancs.

4 - La freqüència de LOC G.3 creix linealment en instal·lacions amb una massa inferior o igual a 20.000 kg independentment del nombre de tancs que la formin, mentre que a mesura que s'incrementa la massa emmagatzemada a la instal·lació s'observa un creixement exponencial de la freqüència en relació amb el nombre de tancs que formen la instal·lació que s'agreuja a mesura que augmenta la massa.

Com a conclusió d'aquest punt, s'ha observat que en no haver factor d'apantallament, la metodologia emprada tendeix a determinar esdeveniments G.1 en gran part dels ED sorgits. La major freqüència es presenta en una instal·lació amb 100.000 kg en 4 tancs.

7. Determinació de la variació de la freqüència en funció de les variables de disseny

7.1. Procediment de l'estudi

Després de comprovar que existeixen importants diferències entre el model d'ED desenvolupat i l'utilitzat en les AQR, i per tal de mirar de complir l'objectiu secundari del projecte, és necessari realitzar un estudi per tal de proporcionar un model matemàtic que descrigui d'una forma més acurada la freqüència d'ocurrència en instal·lacions susceptibles a Efecte Dòmino.

Per tal de determinar el model matemàtic que ajusti de manera satisfactòria les dades per a tots els accidents estudiats s'han testejat diversos tipus d'equacions per a les dades obtingudes per a cada tipologia d'accident. Posteriorment s'han realitzat corbes en 3D en les que s'ha representat la freqüència d'ocurrència d'un accident en funció de les dues variables de disseny: massa (*m*) i nombre de tancs (*n*). No es pot considerar que la distància entre els tancs sigui una variable de disseny degut a què per al projecte s'ha establert la norma NFPA 58 [6] per a determinar la distància entre els cilindres. Aquest darrer criteri s'ha pres donat que és la norma de major ús arreu del món.

Les dades obtingudes s'han testejat contra tres tipologies d'equacions:

- Equació Gaussiana

- Equació Potencial

- Equació Exponencial/Logarítmica

Finalment s'ha verificat que l'ajustament és correcte mitjançant el criteri de mínims quadrats. Tenint en compte que aquest criteri no és suficient per a garantir un correcte ajustament, doncs aquest criteri tan sols indica si la relació entre les dues variables es lineal o no, però obvia qualsevol altre tipus de relació, s'ha realitzat una verificació utilitzant el mètode d'anàlisi gràfica dels residus.

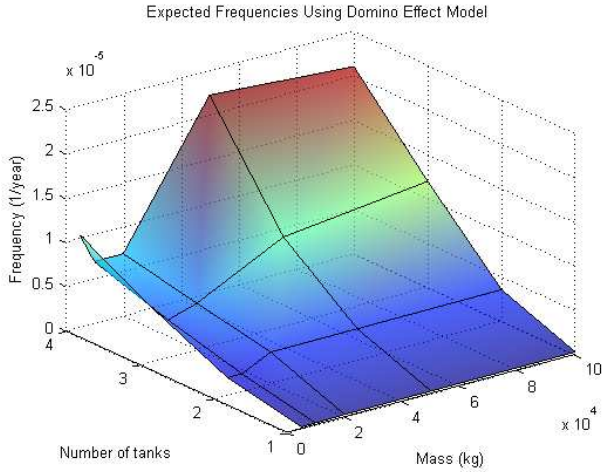
7.2. Representacions gràfiques

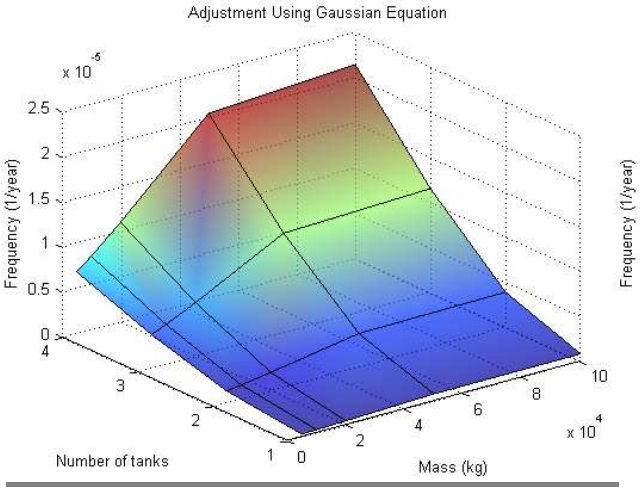
A continuació es mostraran un seguit de figures que representen la freqüència en funció de les variables de disseny. Es mostraran 4 figures: les dades obtingudes pel model d'ED (part superior), l'ajustament gaussià (part inferior esquerre), l'ajustament potencial (part inferior central) i l'ajustament exponencial/logarítmic (part inferior dreta) per a cada una de les tipologies d'accidents estudiades, que recordem són:

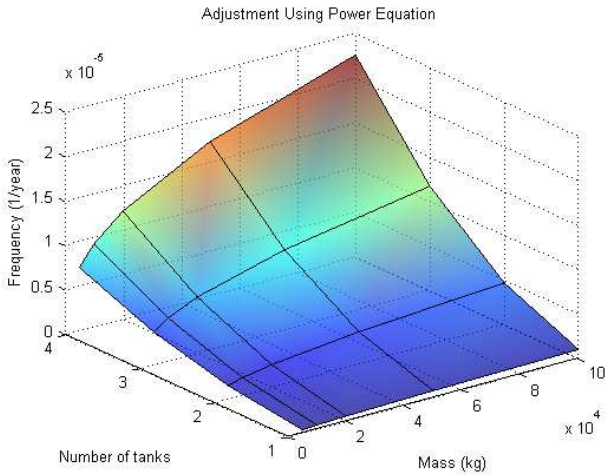
LOC	Accident
G.1	BLEVE
	UVCE
	Flash
	Pool
G.2	Jet Fire
	UVCE
	Flash
	Pool
G.3	Jet Fire
	UVCE
	Flash
	Pool

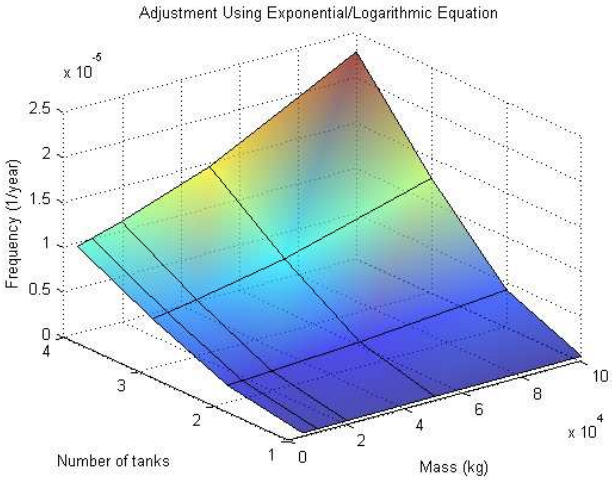
Taula 7.1. Llistat d'accidents estudiats

7.2.1. BLEVE

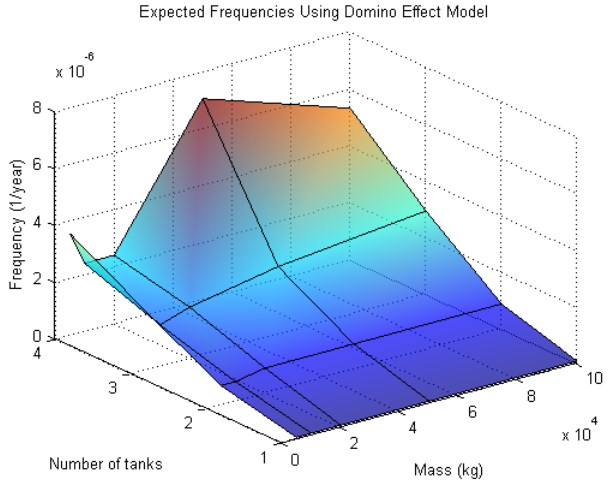

Expected Frequencies Using Domino Effect Model
x 10^-5
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

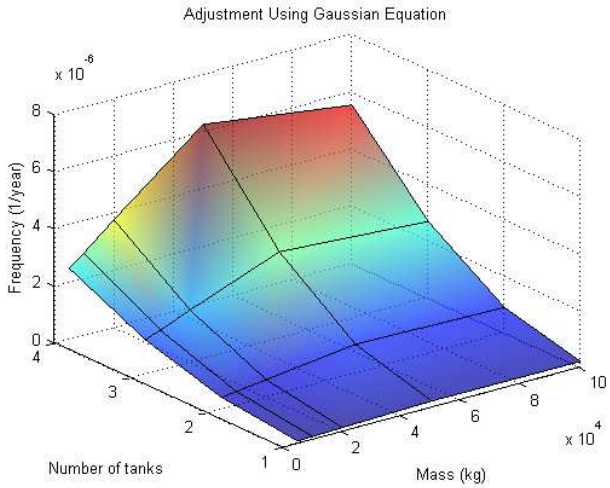

Adjustment Using Gaussian Equation
x 10^-5
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

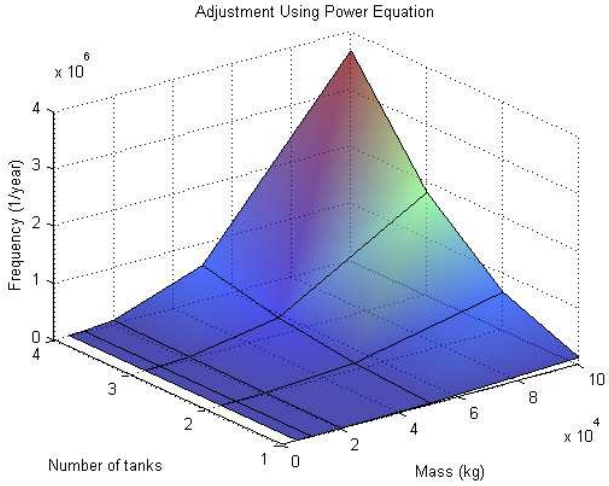

Adjustment Using Power Equation
x 10^-5
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

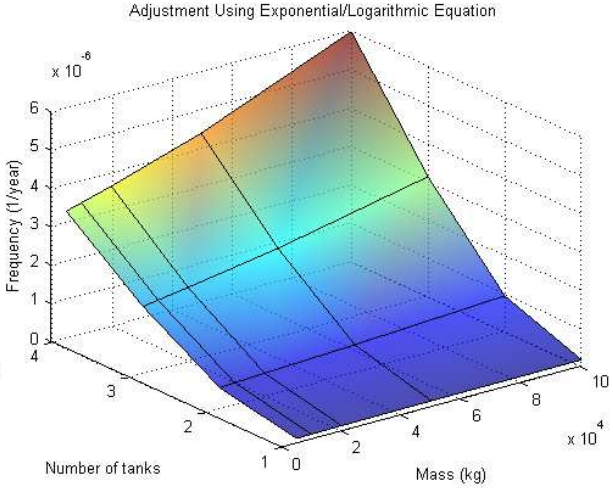

Adjustment Using Exponential/Logarithmic Equation
x 10^-5
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

7.2.2. UVCE - G.1

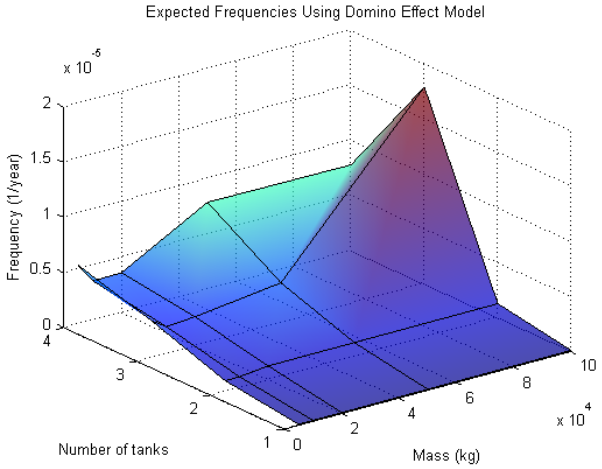

Expected Frequencies Using Domino Effect Model
x 10^-6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

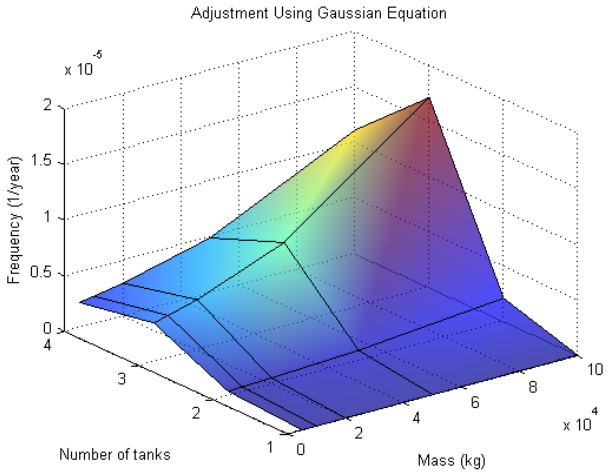

Adjustment Using Gaussian Equation
x 10^-6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

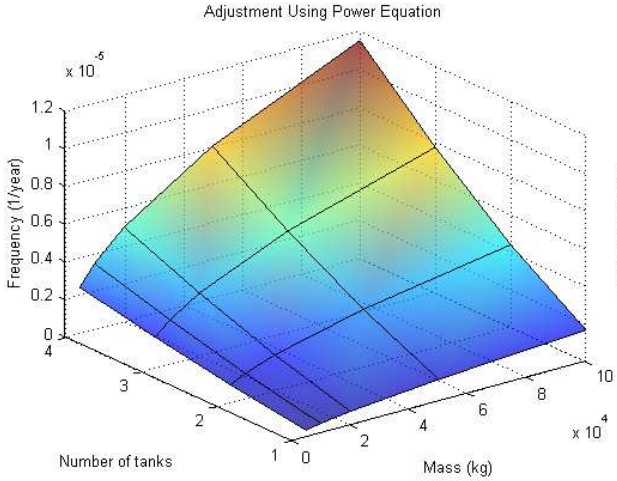

Adjustment Using Power Equation
x 10^6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

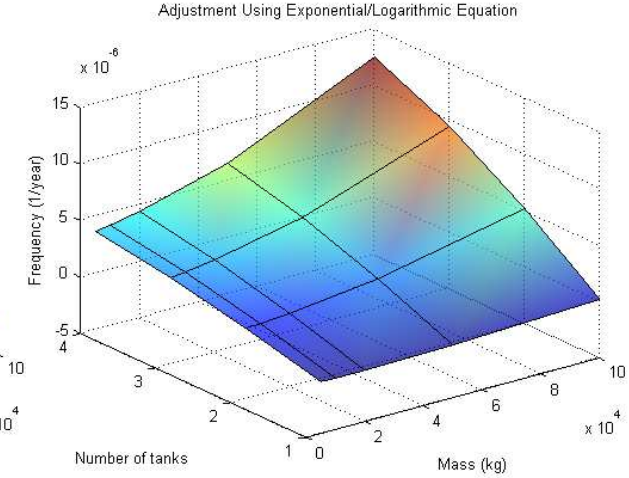

Adjustment Using Exponential/Logarithmic Equation
x 10^-6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

7.2.3. Flash Fire - G.1

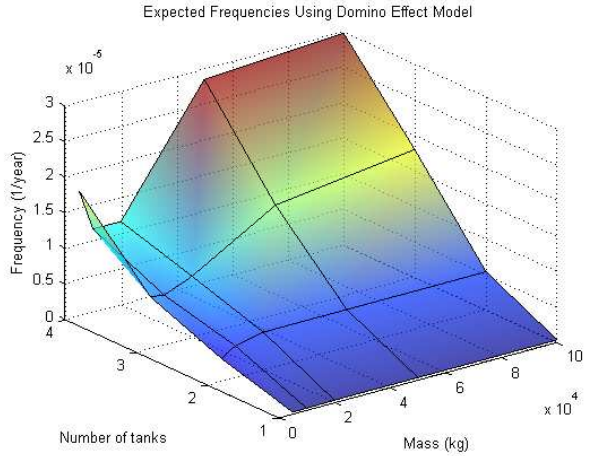


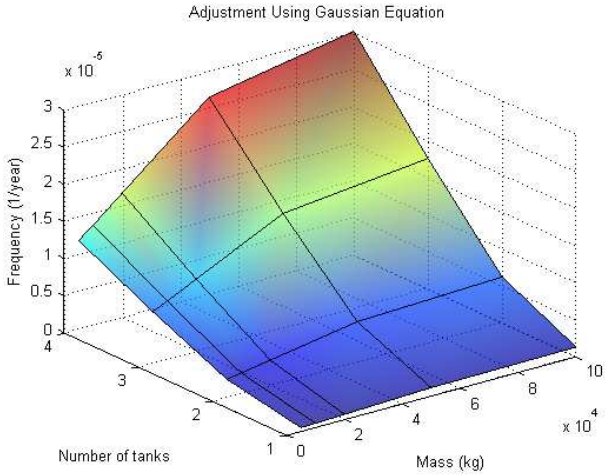


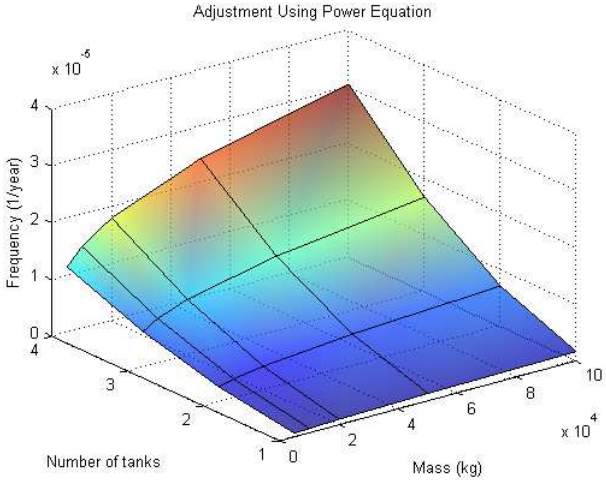


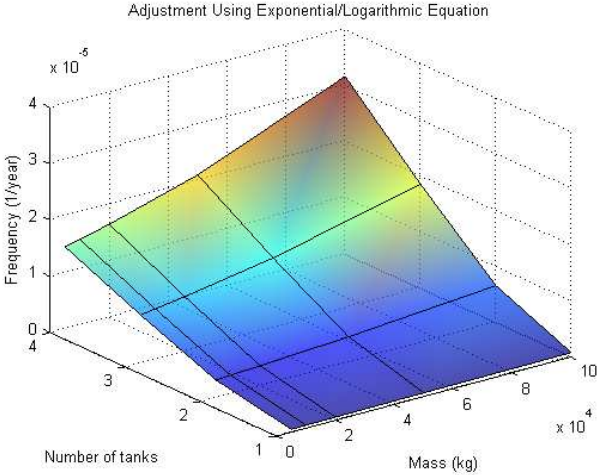


7.2.4. Pool Fire - G.1

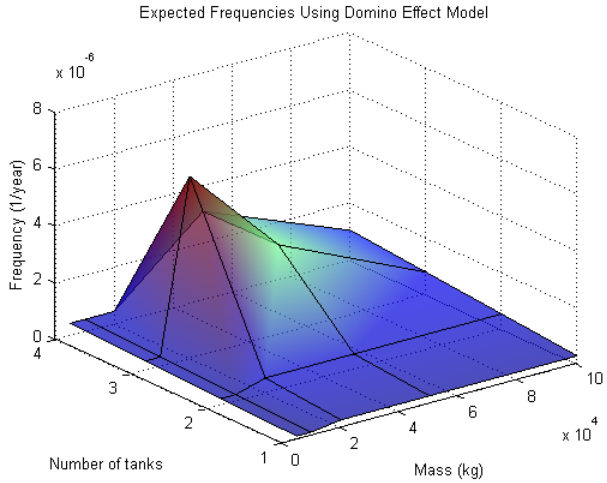


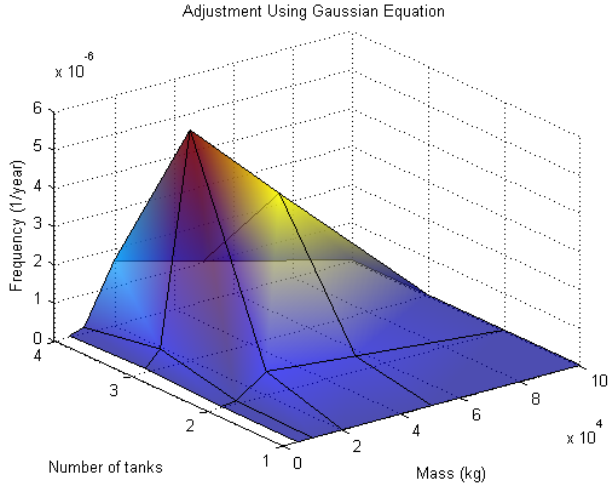


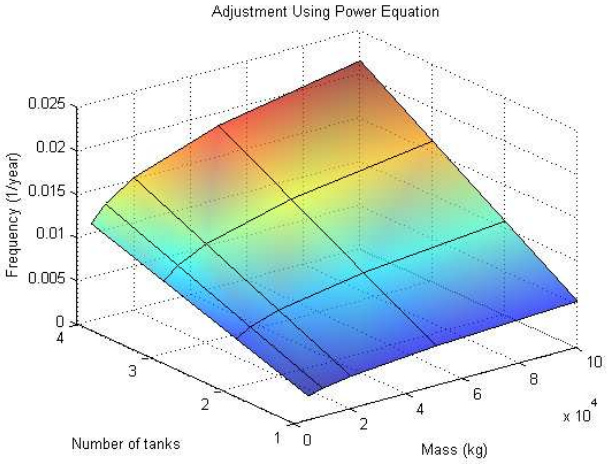


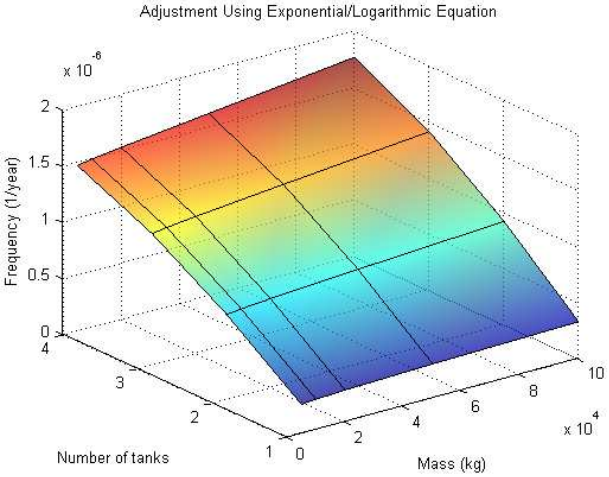


7.2.5. Jet Fire - G.2

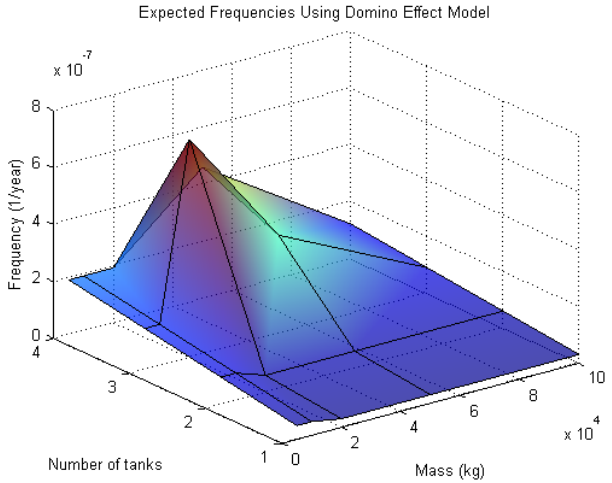


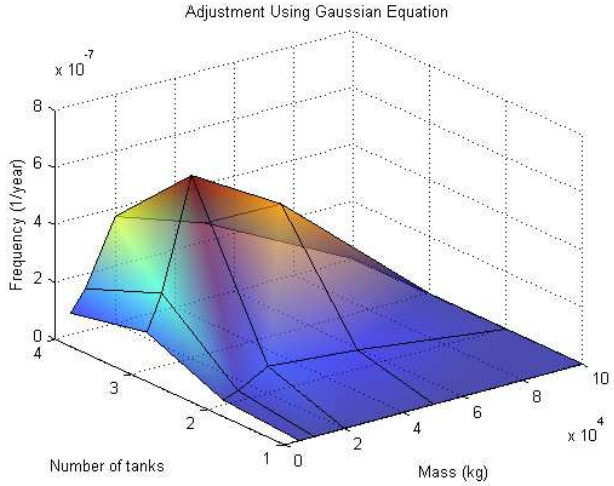


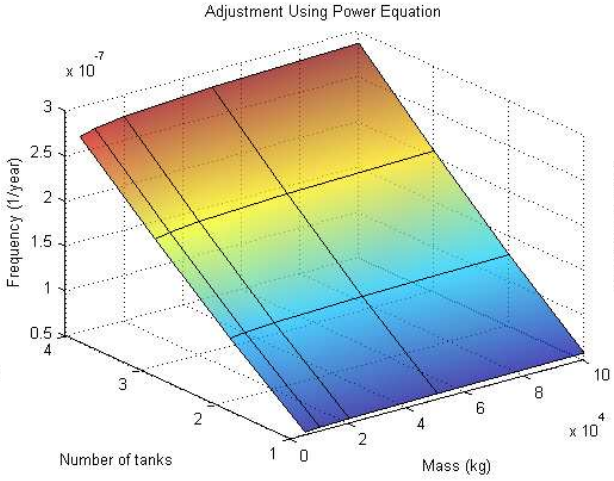


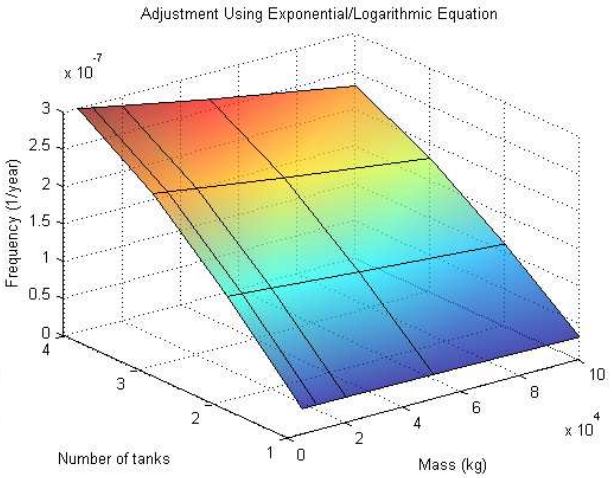


7.2.6. UVCE - G.2

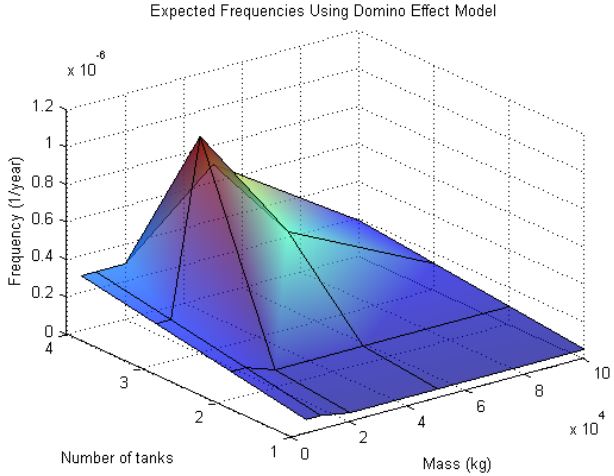

Expected Frequencies Using Domino Effect Model
x 10^-7
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

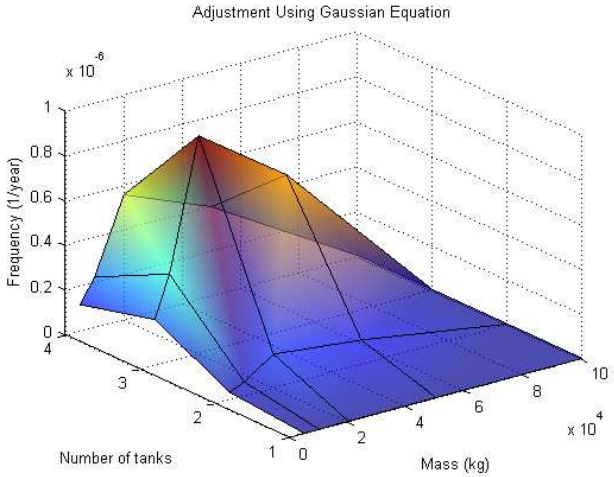

Adjustment Using Gaussian Equation
x 10^-7
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

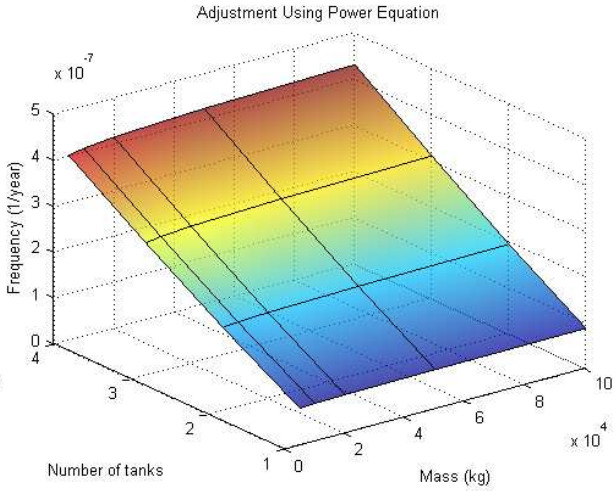

Adjustment Using Power Equation
x 10^-7
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

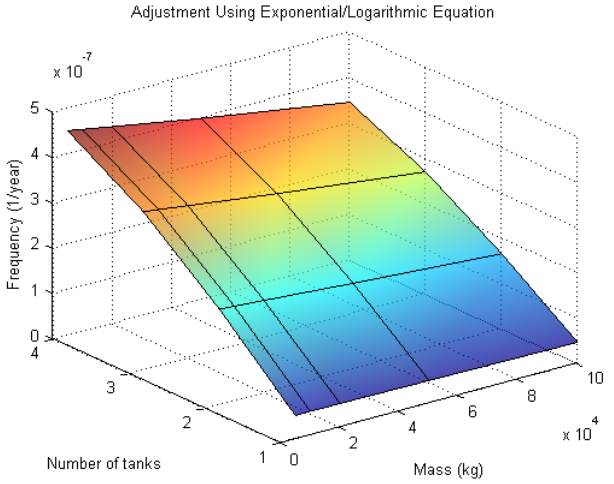

Adjustment Using Exponential/Logarithmic Equation
x 10^-7
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

7.2.7. Flash Fire - G.2

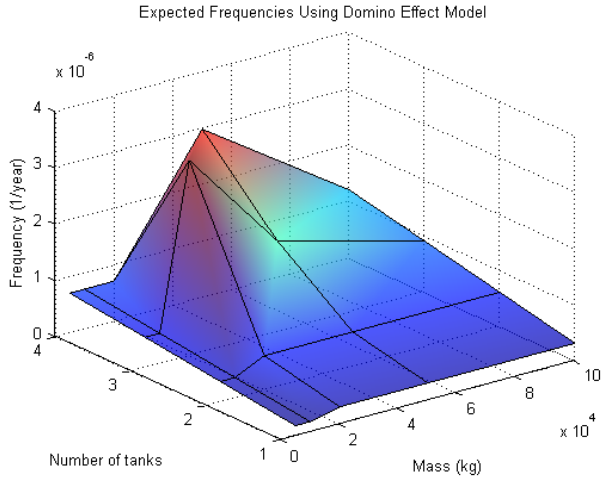


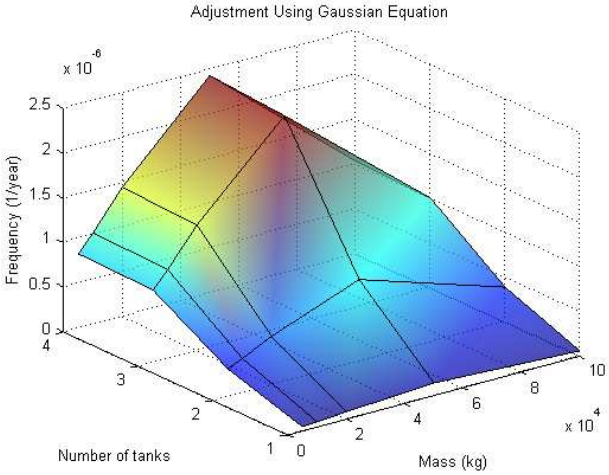


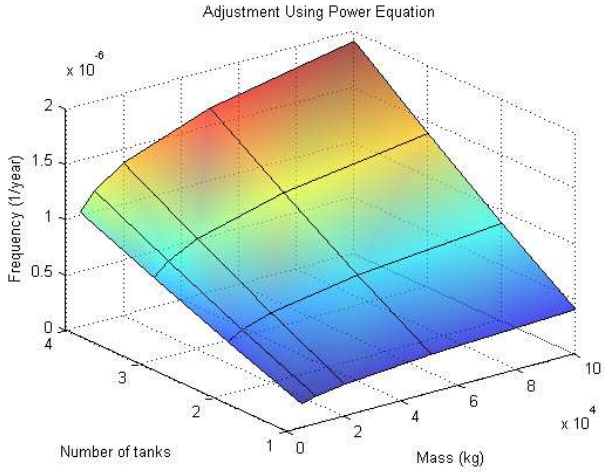


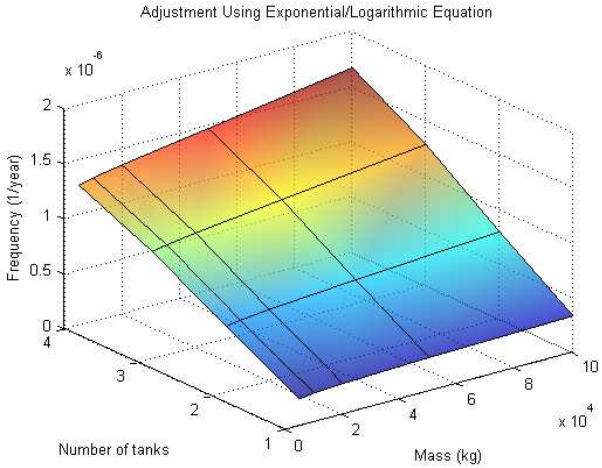


7.2.8. Pool Fire - G.2

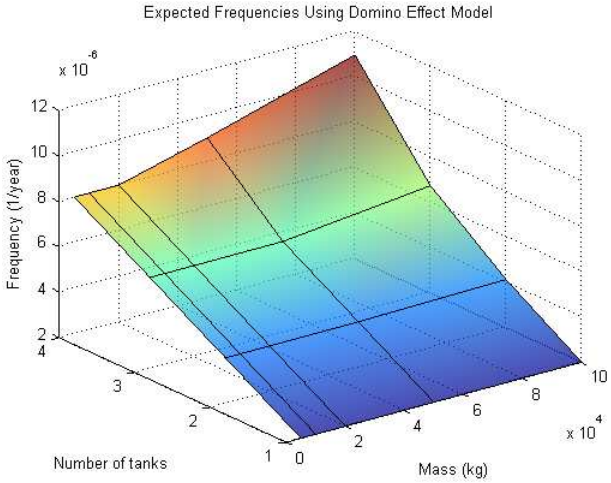


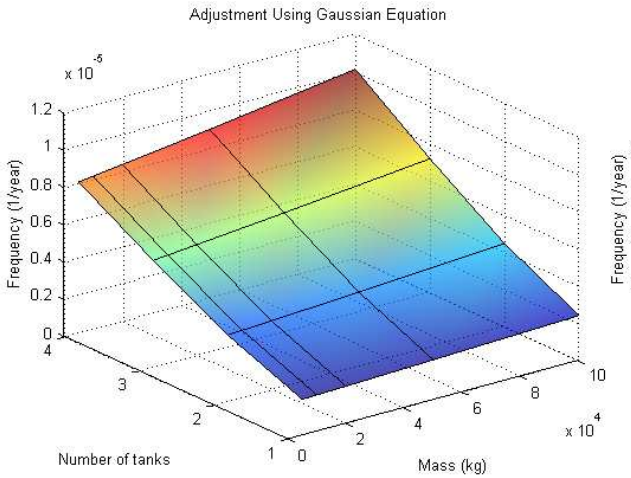


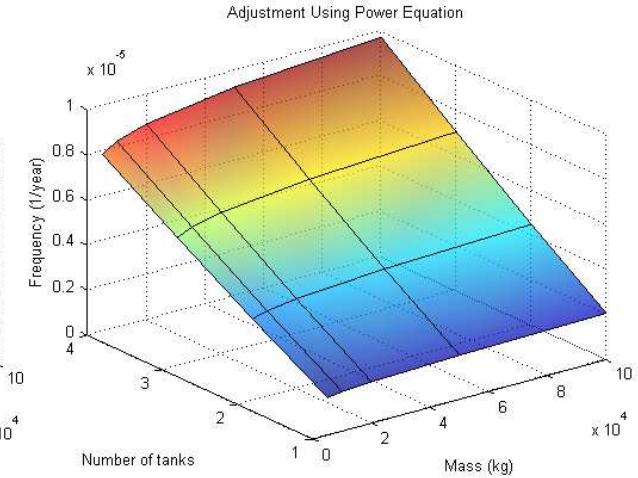


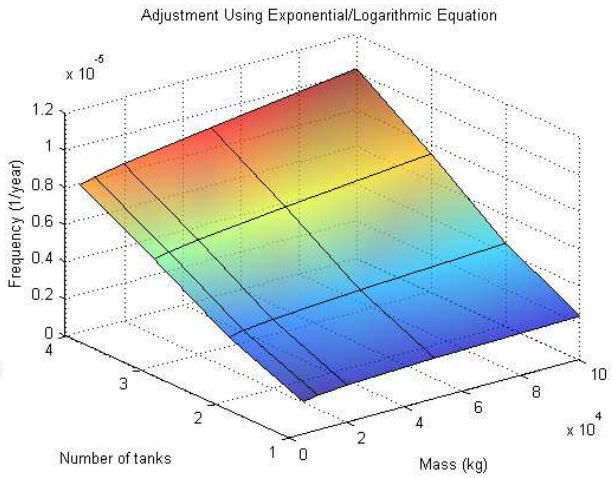


7.2.9. Jet Fire - G.3

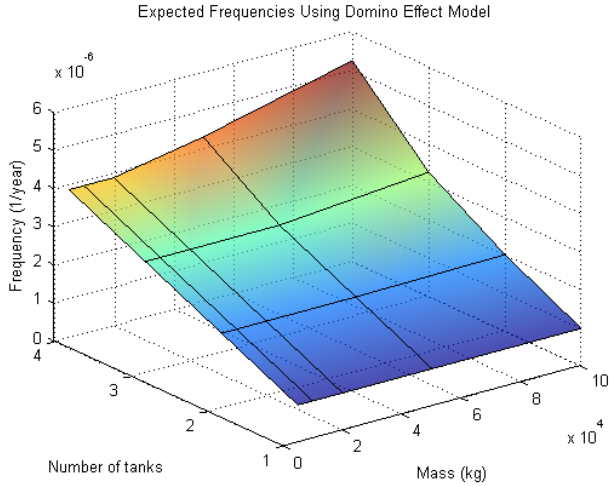


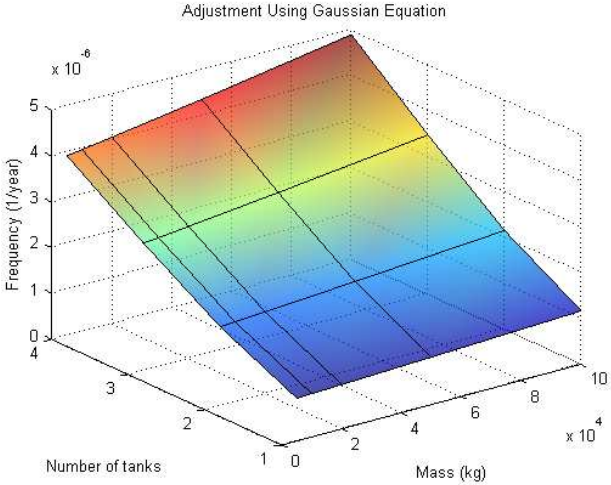


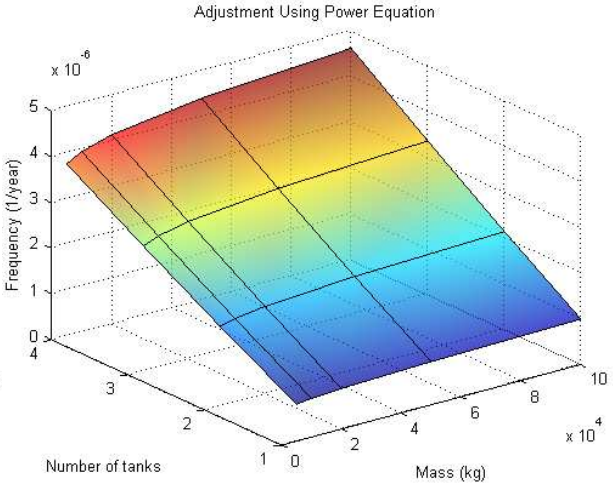


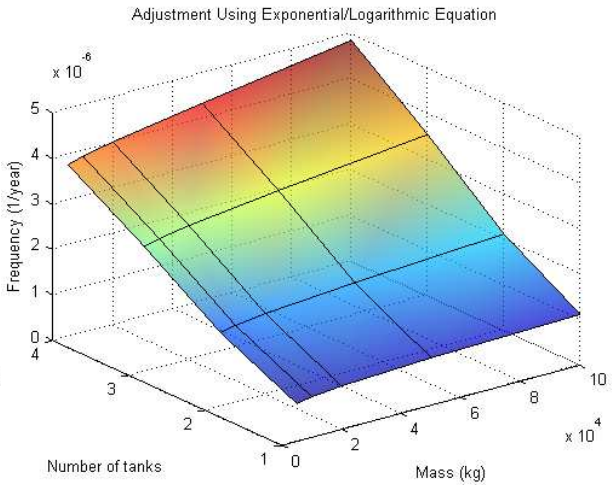


7.2.10. UVCE - G.3

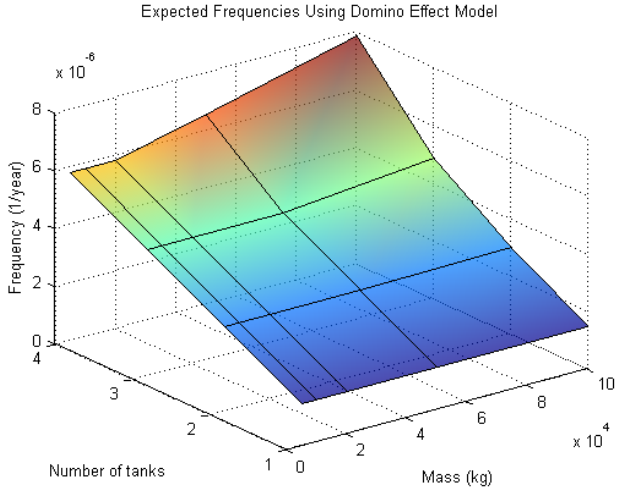

Expected Frequencies Using Domino Effect Model
x 10^-6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

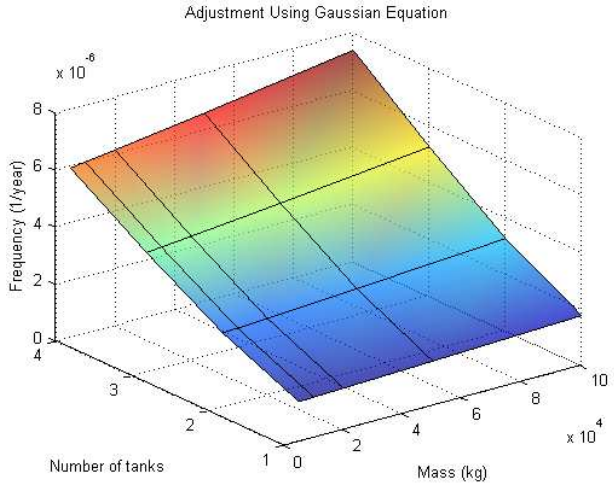

Adjustment Using Gaussian Equation
x 10^-6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

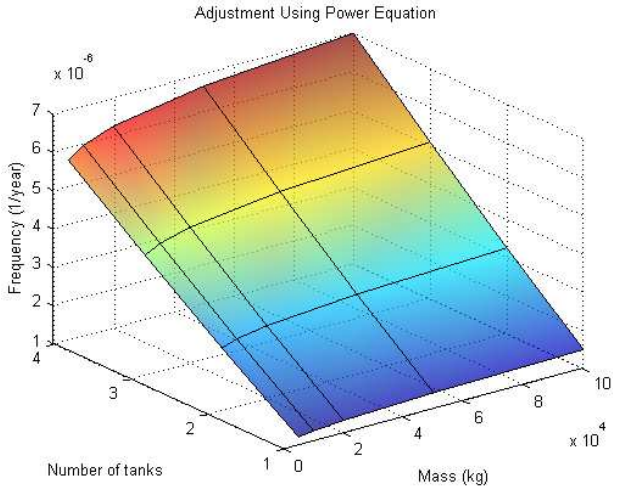

Adjustment Using Power Equation
x 10^-6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

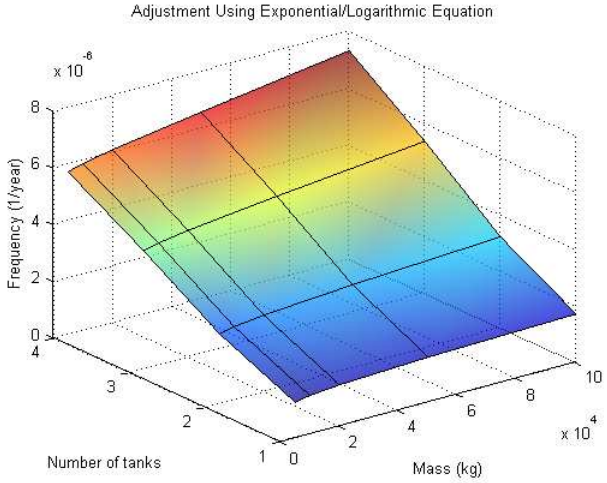

Adjustment Using Exponential/Logarithmic Equation
x 10^-6
Frequency (1/year)
Number of tanks
Mass (kg)
x 10^4

7.2.11. Flash Fire - G.3

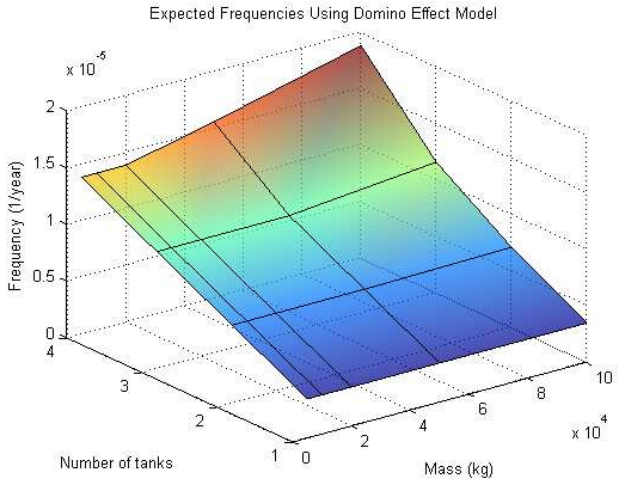


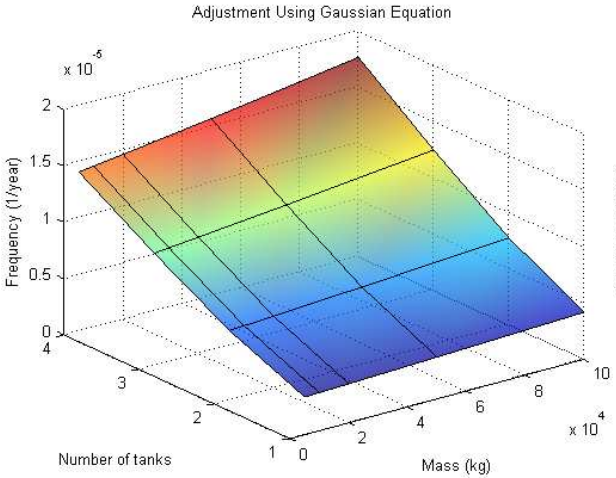


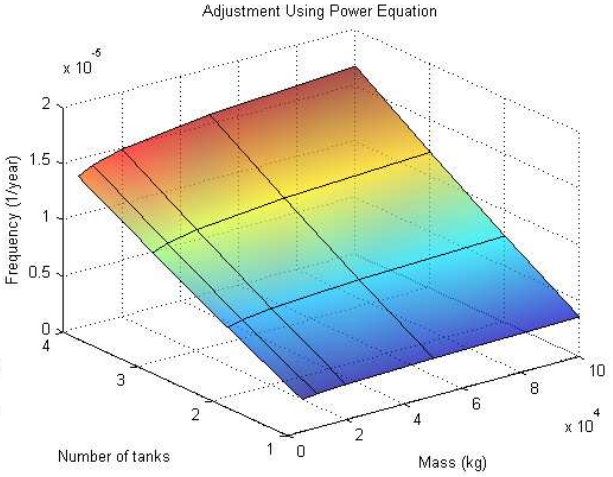


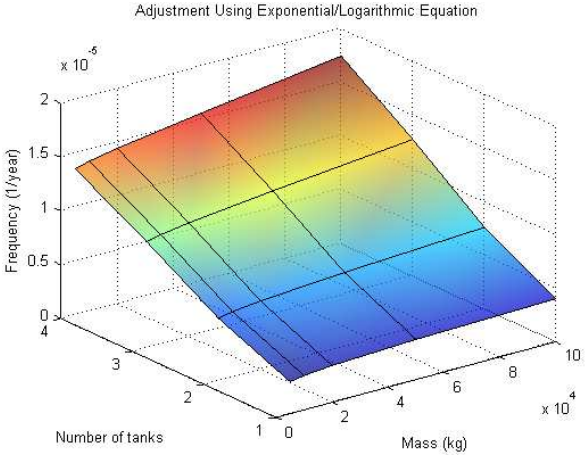


7.2.12. Pool Fire - G.3









7.3. Equacions proposades

Accident	Equació Gaussiana						Equació Potencial				Equació Exponencial/Logarítmica				
	$f = A * exp\left(\frac{(n-B)^2}{C} + \frac{(m-D)^2}{E}\right)$						$f = A * (n^B) * (m^C)$				$f = A * exp\left(\frac{B}{n} + C * m\right) + D * ln(m)$				
	Coeficients					R^2	Coeficients			R^2	Coeficients				R^2
	A	B	C	D	E		A	B	C		A	B	C	D	
BLEVE	$2{,}8\cdot10^{-5}$	4,79	-4,15	$7{,}7\cdot10^{4}$	$-4\cdot10^{9}$	0,944	$1{,}1\cdot10^{-8}$	2,30	0,39	0,896	$5{,}5\cdot10^{-5}$	-7,28	$9{,}3\cdot10^{-6}$	$3{,}5\cdot10^{-8}$	0,872
G.1 UVCE	$9{,}9\cdot10^{-6}$	5,37	-5,10	$7{,}0\cdot10^{4}$	$-4\cdot10^{9}$	0,916	$9{,}1\cdot10^{-9}$	2,50	0,26	0,857	$2{,}4\cdot10^{-5}$	-8,14	$6{,}4\cdot10^{-6}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	0,836
G.1 Flash	$2{,}8\cdot10^{-2}$	3,33	-0,8	$1{,}0\cdot10^{2}$	$-1{,}2\cdot10^{11}$	0,852	$4{,}0\cdot10^{-9}$	1,41	0,52	0,546	$9{,}3\cdot10^{-6}$	-3,07	$1{,}2\cdot10^{-5}$	$-1\cdot10^{-7}$	0,641
G.1 Pool	$3{,}4\cdot10^{-5}$	4,57	-3,96	$8{,}3\cdot10^{4}$	$-6{,}3\cdot10^{9}$	0,948	$4{,}0\cdot10^{-8}$	2,11	0,32	0,918	$7\cdot10^{-5}$	-6,56	$8{,}2\cdot10^{-6}$	$4{,}6\cdot10^{-8}$	0,915

Accident	Equació Gaussiana						Equació Potencial				Equació Exponencial/Logarítmica				
	A	B	C	D	E	R^2	A	B	C	R^2	A	B	C	D	R^2
G.2 Jet	$2{,}2\cdot10^{-5}$	3,14	-0,56	$3{,}4\cdot10^{4}$	$-1{,}5\cdot10^{8}$	0,839	$4{,}2\cdot10^{-4}$	1,01	0,22	0,149	$2{,}8\cdot10^{-6}$	-3,02	$1{,}8\cdot10^{-6}$	$1{,}4\cdot10^{-8}$	0,129
G.2 UVCE	$1{,}1\cdot10^{-6}$	3,28	-0,82	$3{,}3\cdot10^{4}$	$-3{,}9\cdot10^{8}$	0,772	$4{,}3\cdot10^{-8}$	1,16	0,24	0,261	$6{,}5\cdot10^{-7}$	-3,18	$-3\cdot10^{-6}$	$8{,}3\cdot10^{-10}$	0,294
G.2 Flash	$1{,}6\cdot10^{-6}$	3,27	-0,82	$3{,}3\cdot10^{4}$	$-3{,}9\cdot10^{8}$	0,771	$6{,}5\cdot10^{-8}$	1,16	0,24	0,261	$9{,}8\cdot10^{-7}$	-3,18	$-3\cdot10^{-6}$	$1{,}2\cdot10^{-9}$	0,294
G.2 Pool	$2{,}7\cdot10^{-6}$	3,53	-2,17	$5{,}5\cdot10^{4}$	$-2{,}3\cdot10^{9}$	0,568	$3{,}7\cdot10^{-8}$	1,13	0,21	0,332	$2{,}8\cdot10^{-6}$	-3,88	$2{,}8\cdot10^{-6}$	$2{,}2\cdot10^{-8}$	0,292
G.3 Jet	$1{,}5\cdot10^{-4}$	6,13	-0,15	$2{,}2\cdot10^{6}$	$-1{,}8\cdot10^{12}$	0,984	$9{,}1\cdot10^{-7}$	1,12	$7\cdot10^{-2}$	0,975	$2{,}2\cdot10^{-5}$	-5,06	$2{,}5\cdot10^{-6}$	$1{,}9\cdot10^{-7}$	0,979
G.3 UVCE	$7{,}8\cdot10^{-5}$	6,04	-0,15	$2{,}3\cdot10^{6}$	$-1{,}9\cdot10^{12}$	0,985	$4{,}5\cdot10^{-7}$	1,11	$6{,}8\cdot10^{-2}$	0,975	$1\cdot10^{-5}$	-5,01	$2{,}4\cdot10^{-6}$	$8{,}9\cdot10^{-8}$	0,979
G.3 Flash	$9{,}2\cdot10^{-5}$	6,10	-0,15	$2{,}1\cdot10^{6}$	$-1{,}7\cdot10^{12}$	0,984	$6{,}7\cdot10^{-7}$	1,12	$7\cdot10^{-2}$	0,976	$1{,}6\cdot10^{-5}$	-5,04	$2{,}4\cdot10^{-6}$	$1{,}3\cdot10^{-7}$	0,979
G.3 Pool	$2{,}2\cdot10^{-4}$	6,10	-0,15	$2{,}1\cdot10^{6}$	$-1{,}7\cdot10^{12}$	0985	$1{,}6\cdot10^{-6}$	1,12	$6{,}9\cdot10^{-2}$	0,975	$3{,}8\cdot10^{-5}$	-5,04	$2{,}4\cdot10^{-6}$	$3{,}2\cdot10^{-7}$	0,979

7.4. Model de validació. Anàlisi de residus

És interessant observar que els accidents G.1 i G.3 poden ser modelats utilitzant qualsevol de les tres equacions proposades, mentre que els accidents G.2 tan sols s'ajusten correctament amb l'equació Gaussiana.

Observant el R^2 es pot comprovar que el model Gaussià és el que millor s'ajusta a les dades obtingudes per a tots els accidents i freqüències. Tot i això, el criteri dels mínims quadrats no és suficient per afirmar que el model és vàlid, de manera que s'ha realitzat la validació del model mitjançant l'anàlisi gràfica dels residus i el test Chi-quadrat.

Els residus d'un model ajustat representen les diferències entre el valor observat, per a cada combinació de valors de les variables, i la corresponent predicció utilitzant la funció de regressió.

Si l'ajustament de les dades del model fos correcte, els residus s'aproximarien als errors aleatoris que fan de la relació entre les variables explicatives i les variables resposta una relació estadística. A més, si els residuals apareixen amb un comportament aleatori significa que el model ajusta correctament. Per altre banda, és un clar signe que l'ajustament del model és pobre si és evident una estructura no aleatòria en els residus.

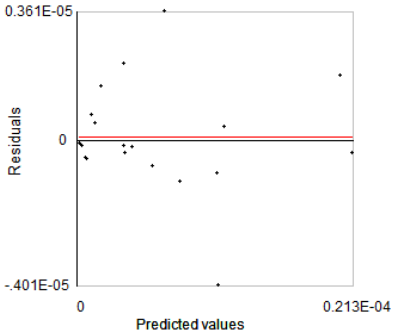
A continuació es presenten els gràfics dels residus enfront dels *predictors* en aplicar les diferents equacions a totes les tipologies d'accidents. Es mostraran 3 grups formats per les 4 gràfiques corresponents a les diferents tipologies de pèrdues d'inventari segons el Purple Book [5]. L'ordre de cada un dels grups de gràfics és el mateix en què s'han presentat els resultats al llarg del projecte:

- Accidents G.1: BLEVE, UVCE, Flash Fire i Pool Fire.

- Accidents G.2: Jet Fire, UVCE, Flash Fire i Pool Fire.

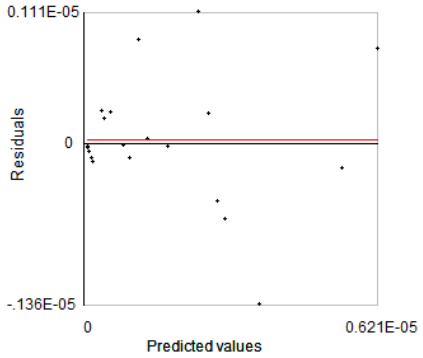
- Accidents G.3: Jet Fire, UVCE, Flash Fire i Pool Fire.

7.4.1. Gràfics dels Residus. Accidents G.1



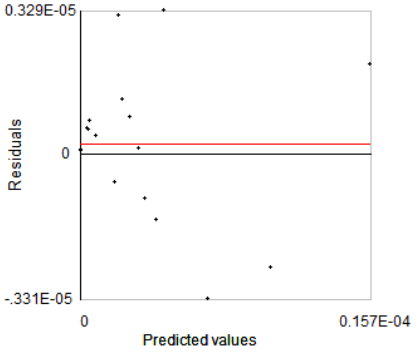
Residuals versus Predicted values

Red line: average error = 7.6089584E-08



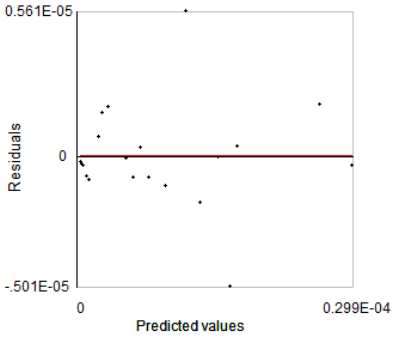
Residuals versus Predicted values

Red line: average error = 2.6905344E-08



Residuals versus Predicted values

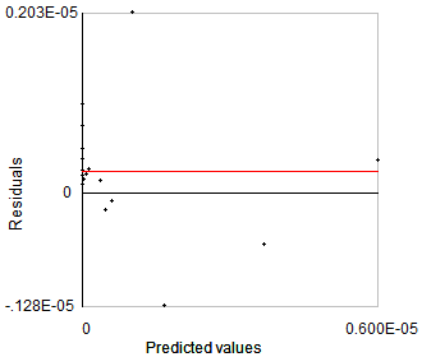
Red line: average error = 2.2169539E-07



Residuals versus Predicted values

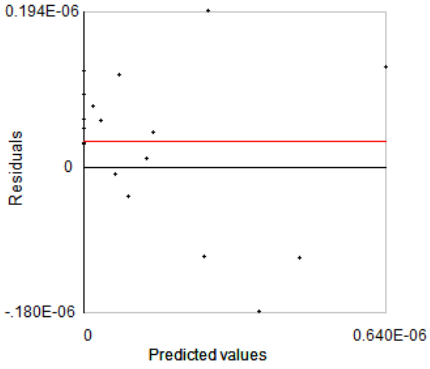
Red line: average error = 1.6452033E-08

7.4.2. Gràfics dels Residus. Accidents G.2



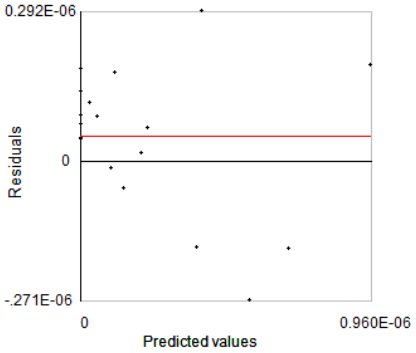
Residuals versus Predicted values

Red line: average error = 2.3887009E-07



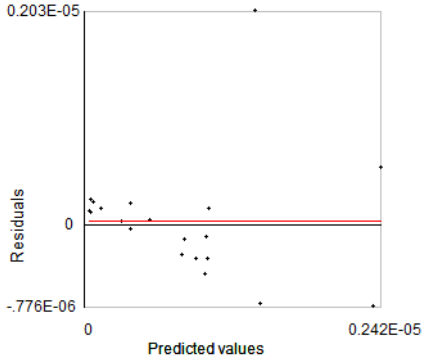
Residuals versus Predicted values

Red line: average error = 3.1174110E-08



Residuals versus Predicted values

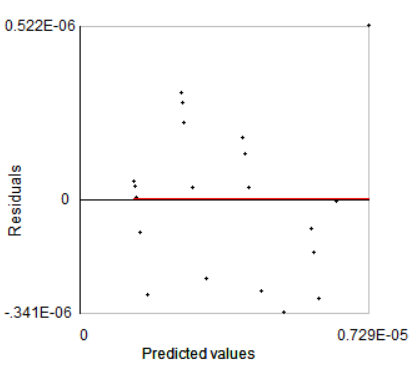
Red line: average error = 4.6764292E-08



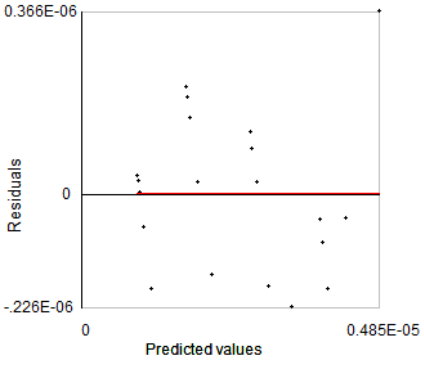
Residuals versus Predicted values

Red line: average error = 3.0418825E-08

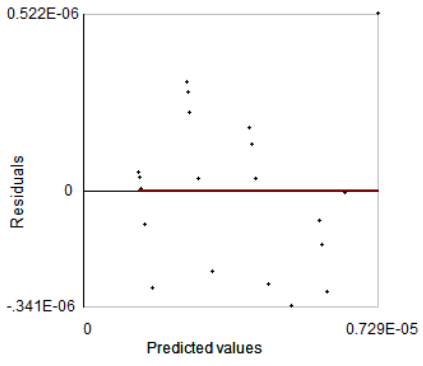
7.4.3. Gràfics dels Residus. Accidents G.3



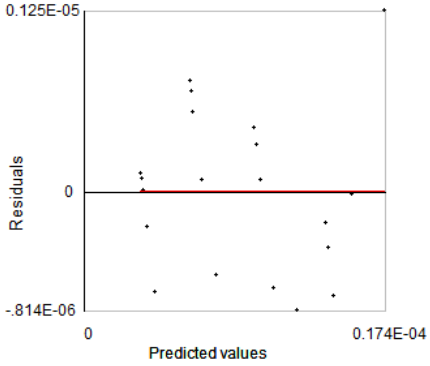
Residuals versus Predicted values
Red line: average error = 3.3869738E-09



Residuals versus Predicted values
Red line: average error = 2.2618665E-09



Residuals versus Predicted values
Red line: average error = 3.3869738E-09



Residuals versus Predicted values
Red line: average error = 8.0890059E-09

7.5. Conclusions

Després d'haver estudiat la variació de la freqüència d'ocurrència d'efecte dòmino en funció de les variables massa (m) i nombre de tancs (n), es pot concloure que:

1 - Existeixen models que ajusten amb un major grau de precisió la freqüència d'accidents amb efecte dòmino que el mètode utilitzat en la realització de les AQR a Catalunya.

2 - En base al resultat segons el criteri de mínims quadrats, i que a l'anàlisi de residus no s'observa cap patró, el model basat en equacions gaussianes permet definir de forma més ajustada les freqüències de totes les tipologies d'accidents estudiades. A més, és un model que permet un mètode d'aplicació no costós.

$$f = A * exp\left(\frac{(n-B)^2}{C} \mid \frac{(m-D)^2}{E}\right)$$

3 - S'ha comprovat que els accidents G.1 i G.3 també poden ser modelats utilitzant un model potencial o bé un model exponencial/logarítmic.

Impacte ambiental

El impacte ambiental causat per la realització del projecte no va més enllà del fulls de paper consumit durant les etapes d'execució i lliurament del projecte, que en total s'aproxima a 350 folis, el que equival a 1,75 kg. A més, s'hauria de computar el impacte ambiental causada per a generar l'energia elèctrica necessària per donar corrent als ordinadors durant les hores de realització del projecte.

Pel que fa al impacte ambiental que suposaria la implantació del present projecte, aquest tindria repercussions considerablement majors que el impacte comentat en el paràgraf anterior. Si es portés a terme el projecte, s'haurien de revisar totes les Anàlisis Quantitatives de Risc realitzades amb la possibilitat que les corbes d'isorisc que es generen a cada instal·lació industrial es veiessin afectades. Aquestes corbes afecten directament en els plans urbanístics dels municipis, i per tant, la distribució i aprofitament dels espais municipals propers a instal·lacions d'emmagatzematge de GLP.

Pressupost del Projecte

El present projecte s'ha basat fonamentalment, en la realització d'una determinada quantitat de simulacions per tal de prendre dades per a posteriorment desenvolupar-ne un extens anàlisi i extreure'n les conclusions corresponents, per tant, durant l'execució del projecte s'han dut a terme les activitats següents:

Activitat	Recurs	Cost/hora	Total hores	Cost (€)
Planificació i Definició del projecte	Director	45 €/h	8	360
	Especialista	25 €/h	8	200
	Tècnic	15 €/h	8	120
Explotació del model	Especialista	25 €/h	60	1.500
	Tècnic	15 €/h	80	1.200
Anàlisi de resultats	Director	45 €/h	16	720
	Especialista	25 €/h	16	400
	Tècnic	15 €/h	16	240
Documentació	Tècnic	15 €/h	240	3.600
Total				**8.340 €**

Taula 9. Pressupost econòmic de realització del projecte

Conclusions

És important concloure que la metodologia proposada no pretén substituir l'actual ni ser una metodologia universal, sinó simplement posar de manifest que la metodologia a seguir segons la normativa de les AQR no és del tot adequada. Per tant, després de la realització del projecte es pot concloure que s'han complert tots els objectius proposats donat que:

1 - S'ha desenvolupat una metodologia que permet obtenir informació referent a la millor combinació de les variables, nombre de tancs i massa emmagatzemada, per al disseny d' instal·lacions d'emmagatzematge de GLP per tal de minimitzar el risc d'ED.

2 - La metodologia desenvolupada per al càlcul de freqüències d'ocurrència d'accidents associats a ED que demostra que la metodologia d'estimació proposada per la normativa catalana de realització de les AQR no és suficientment precisa, degut a què la freqüència d'ocurrència d'accidents d'ED no experimenta un creixement lineal, multiplicant per un factor de 2, tal i com proposa la metodologia esmentada.

Cal remarcar, també, que concretament en els accidents originats a partir d'una pèrdua instantània de l'inventari complet, la metodologia emprada en les AQR produeix una subestimació considerable de la freqüència d'ocurrència, posant de manifest la poca idoneïtat de la metodologia.

3 - S'ha demostrat que existeixen models que ajusten amb un major grau de precisió la freqüència d'ocurrència d'aquesta tipologia d'accidents, obtenint els millors resultats amb un model basat en equacions gaussianes.

Agraïments

Voldria expressar paraules d'agraïment a totes les persones que han fet possible la realització d'aquest projecte.

- A la meva família per donar-me el suport econòmic i moral per a realitzar i finalitzar el projecte.

- A l'empresa DLM Group, per donar-me totes les facilitats i flexibilitat horària per a poder realitzar l'estudi a les instal·lacions del CERTEC.

- A tots els membres del CERTEC, per l'acollida i el tracta rebut.

Tot i això, m'agradaria agrair especialment a les dues persones, ambdós membres del CERTEC, que han estat implicades en l'estudi donant-me tot el seu suport:

- Esteban Bernechea, per la seva permanent ajuda i implicació i pel seu suport tècnic en tots els aspectes del projecte.

- Josep Arnaldos, per la brindar-me la oportunitat de realitzar el projecte, mostrant així la seva confiança en mi, i pels consells i l'orientació en tot moment.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

[1] J. CASAL, H. MONTIEL, E. PLANAS, J.A. VÍLCHEZ. "Análisis de riesgo en instalaciones industriales". Edicions UPC, setembre 1999.

[2] Casal, J. "Evaluation of the effects and the consequences of major accidents in industrial plants", Elsevier, Amsterdam (2008).

[3] Antonioni et al. / Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22 (2009) 614–624. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area]

[4] CPR 12E. Red Book: Methods for determining and processing probabilities. TNO. The Hague (Holanda), 2005.

[5] CPR 18E. Purple Book: Guideline for quantitative risk assessment. TNO. The Hague (Holanda), 2005.

[6] "Liquified Petroleum Gas Code". National Fire Protection Association (EEUU). Edició 2001.

[7] Reference Manual Bevi Risk Assessments v. 3.2, National Institute of Public Health and Environment (RIVM). Bilthoven (Netherland), 2009.

[8] Antonioni, G., Spadoni, G., Cozzani, V. “Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*, 22, 614-624, 2009.

[9] Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S. “The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis”. *Journal of Hazardous Materials*, A127, 14-30, 2005.

[10] "Instrucció 14/2008. Criteris per a la realització de les Anàlisis Quantitatives de Risc a Catalunya". Departament de Indústria i Empresa (Catalunya), 2008.

[11] CPR 14E. Yellow Book: Methods for the calculation of physical effects. TNO. The Hague (Holanda). 2005.