

Introducción del Factor Humano al Análisis de Riesgo

José Roberto González Dan

Departamento de Ingeniería Química
Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico (CERTEC)
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, 2015



Introducción del Factor Humano al Análisis de Riesgo

José Roberto González Dan

Tesis presentada para obtener el título de Doctor otorgado por la Universitat Politècnica de Catalunya

Dirigida por

Dra. Rosa Mari Darbra Roman

Dr. Josep Arnaldos Viger

Departamento de Ingeniería Química
Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico (CERTEC)
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, 2015



AGRADECIMIENTOS

Primero que nada quisiera agradecer a mi familia, en estos 5 años que he vivido fuera he aprendido que no hay nada más importante que la familia, la cual he extrañado mucho en todo este tiempo, tanto a mi padre, mis abuelos, tíos y tías, primos etc. Pero especialmente a mi Madre, gracias a ella es posible que yo esté aquí ahora escribiendo esto. Más que cariño y amor le tengo gran admiración, y espero algún día poder pagarle todo lo que ha hecho por mí.

Gracias a todo el CERTEC por haberme dado un ambiente de trabajo muy agradable en donde he encontrado personas excepcionales, a los profesores Joaquim, Elsa, Eulalia, Juan Antonio. Y a las personas que han pasado por el CERTEC, que de alguna manera he aprendido de ellos y me han dejado marcado en este tiempo que tuve el gusto de convivir con ellos profesionalmente, Miguel, Esteban, Diana, Adriana Palacios, Miki, Ariadna, Alan, Isabel, Giovanni, Marti, Behrouz, Oriol, Mario Miguel, Diana Tarrago, Marco, Mariana, Estefania, Federica, Adriana Miralles.

Muchas gracias al profesor Josep Arnaldos, por ser de gran ayuda como director y toda su disposición para ayudarme siempre, todos sus comentarios y consejos fueron partes clave para en el desarrollo de esta tesis y no menos importante, a Rosa Mari, que tuve la fortuna de tenerla también como directora, nunca había conocido a una persona tan dedicada y que le pusiera tanto empeño en su vocación como profesora e investigadora y al mismo tiempo ser tan grandísima persona. Aprendí muchísimo de ella y estoy seguro que nunca en mi vida profesional volveré a tener una jefa tan buena como ella, tanto en el trato laboral como personal. De verdad muchas gracias.

Aunque extrañé mucho a mi familia, hice mi propia familia aquí, mis amigos. Gracias a ellos pude salir adelante en muchas situaciones que me puso la vida y además, de poder disfrutarla al máximo. Xavi, porque aparte de que corresponde al grupo de personas con quien trabajé, se convirtió en uno de mis mejores amigos, y no puedo ni imaginar haber terminado este doctorado sin haber tenido su compañía en todo este tiempo. Y Luis, que ha estado ahí desde el principio, desde el día 1 que comencé el Master, y hemos compartido viajes, historias y sabe que es parte de mi familia y que será de las personas que más extrañaré por siempre. Hice también hermanos como Jose, que siento lo conozco de años y Eduardo, que aunque me enoje con ellos cuando viajamos, saben que hemos pasado el mejor tiempo de nuestras vidas juntos. Y a mis dos grandísimas amigas Martha y Mónica por soportarme todo este tiempo, a pesar de los corajes que les hago pasar saben cuánto las quiero. A todos ellos, y muchas personas más que no he mencionado, las llevaré siempre en mi mente y mi corazón.

Quisiera agradecer también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo recibido para poder lograr este doctorado. Y a los expertos que contestaron el cuestionario e hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

Gracias Barcelona, nunca te olvidaré.

ABSTRACT

Introduction of the Human Factor into the Risk Analysis

By

José Roberto González Dan

The frequency of occurrence of an accident is a key aspect in the risk assessment field. Variables such as the human factor, which is a major cause of undesired events in process industries, are usually not considered explicitly, mainly due to the uncertainty related to the lack of knowledge and the complexity associated to it.

In this thesis, a frequency modifier has been developed in order to introduce the human factor in the failure frequency estimation. This modifier was created through the application of two methodologies: the fuzzy logic and the Monte Carlo simulation.

The modifiers were applied to four case studies related to real chemical plants. The new frequency values are considered more realistic and accurate since the human factor is now reflected. Consequently, this improves the final risk assessment when it is applied to techniques such as QRA (Quantitative Risk Analysis).

RESUMEN

Introducción del Factor Humano en el Análisis de Riesgo

Por

José Roberto González Dan

La frecuencia de los accidentes es un aspecto muy importante en el campo del análisis del riesgo. Variables como el factor humano, el cual es una de las mayores causas de eventos no deseados en las industrias de proceso, en general no se considera explícitamente. Esto se debe a la incertidumbre que se genera debido a la falta de información y la complejidad de este factor.

En esta tesis, se desarrolló un modificador de la frecuencia de accidentes con el objetivo de introducir el factor humano en la estimación de riesgo. Esto se hizo mediante la aplicación de dos metodologías: La lógica difusa y la simulación de Monte Carlo.

Los modificadores fueron aplicados a cuatro casos de estudios relacionados a industrias químicas reales. Los nuevos valores de frecuencia son considerados más realistas debido a que ya incluyen el factor humano. Consecuentemente, la evaluación final del riesgo mejora cuando se aplican estos valores a técnicas como el Análisis Cuantitativo de Riesgo.

Tabla de contenido

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Motivación.....</i>	1
1.2 <i>Objetivos de la tesis.....</i>	3
1.3 <i>Desarrollo de la tesis.....</i>	3
CAPÍTULO II. EVALUACIÓN DEL RIESGO EN LA INDUSTRIA QUÍMICA	7
2.1 <i>Introducción.....</i>	8
2.2 <i>Estimación de la frecuencia de los accidentes.....</i>	10
2.2.1 <i>Bases genéricas de fallos de accidentes.....</i>	10
2.2.2 <i>Análisis histórico de accidentes</i>	14
2.2.3 <i>Árboles de fallos.....</i>	16
2.2.4 <i>Árboles de eventos con datos de probabilidad.....</i>	17
2.3 <i>Estimación de la magnitud de las consecuencias de los accidentes.....</i>	18
2.4 <i>Obtención del riesgo.....</i>	20
2.5 <i>Análisis cuantitativo de riesgo (ACR).....</i>	24
2.6 <i>Incertidumbre en la evaluación del riesgo.....</i>	26
2.6.1 <i>Lógica Difusa</i>	28
2.6.2 <i>Simulación de Monte Carlo</i>	29

CAPÍTULO III- FACTORES HUMANOS	31
3.1 <i>Introducción.....</i>	32
3.2 <i>Definición del concepto de factor humano</i>	33
3.3 <i>Importancia del factor humano en la industria</i>	35
3.4 <i>Accidentes atribuidos al factor humano.....</i>	38
3.4.1 Piper Alpha	39
3.4.2 Accidente Texaco	41
3.5 <i>Marco legal.....</i>	43
3.5.1 Directivas SEVESO	43
3.5.2 Directiva 89/654/EEC	45
3.5.3 Directiva 2003/10/EEC	46
3.5.4 Otras legislaciones.....	46
3.6 <i>Evolución del factor humano en la prevención de accidentes</i>	46
CAPÍTULO IV. LÓGICA DIFUSA	57
4.1 <i>Introducción.....</i>	58
4.2 <i>Lógica difusa vs Lógica clásica.....</i>	59
4.3 <i>Desarrollo del método difuso.....</i>	60
4.3.1 Fusificación.....	61
4.3.2 Proceso de Inferencia difusa	65
4.3.3 Desfusificación	76
CAPÍTULO V. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA BASADA EN LA LÓGICA DIFUSA.....	79
5.1 <i>Modificador difuso de la frecuencia de accidentes.....</i>	80
5.2 <i>Fusificación</i>	82
5.2.1 Identificación de las variables	82
5.2.2 Definición de los conjuntos difusos.....	85
5.2.3 Establecimiento de las funciones de pertenencia.....	86

5.3	<i>Cuestionario</i>	90
5.3.1	Estructura del cuestionario	92
5.3.2	Formación de las reglas en el cuestionario	94
5.3.3	Estudio de los pesos de las variables en el cuestionario.....	97
5.3.4	Resultados de los expertos.....	99
5.4	<i>Proceso de inferencia difusa</i>	108
5.4.1	Reglas difusas	108
5.4.2	Introducción de los pesos de las variables	110
5.4.3	Implicación	112
5.4.4	Agregación.....	112
5.5	<i>Desfusificación</i>	113
5.6	<i>Análisis de sensibilidad del modelo</i>	113
5.6.1.	Resultados y conclusiones del análisis de sensibilidad	116
Capítulo VI. Simulación de Monte Carlo y metodología		121
6.1	<i>Introducción</i>	122
6.2	<i>La simulación de Monte Carlo en el análisis de riesgo</i>	122
6.3	<i>Fundamentos de la simulación de Monte Carlo</i>	124
6.3.1	Variables aleatorias	125
6.3.2	Funciones de distribuciones de probabilidad (FDP).....	126
6.3.3	Interpretación de resultados.....	127
6.4	<i>Metodología</i>	128
6.4.1	Establecimiento y caracterización de las variables	129
6.4.2	Obtención de la función característica del modelo.....	130
6.4.3	Caracterización de la incertidumbre en términos de la simulación de Monte Carlo	131
Capítulo VII. Evaluación de casos de estudio y obtención de los modificadores		135
7.1	<i>Introducción</i>	136
7.2	<i>Método de evaluación del comportamiento de la empresa</i>	136

7.2.1	Interpretación de resultados para el caso de la lógica difusa	138
7.2.2	Interpretación de resultados para el caso de la simulación de Monte Carlo.....	140
7.3	<i>Casos de estudio de empresas de productos inflamables.....</i>	<i>141</i>
7.3.1	Caso de estudio A.....	141
7.3.2	Caso de estudio B.....	147
7.4	<i>Casos de estudio de empresas con productos tóxicos e inflamables.....</i>	<i>153</i>
7.4.1	Caso de estudio C.....	154
7.4.2	Caso de estudio D.....	158
Capítulo VIII. Resultados y Discusión.....		163
8.1	<i>Introducción.....</i>	<i>164</i>
8.2	<i>Cálculo de frecuencias finales modificadas</i>	<i>164</i>
8.2.1	Caso de estudio A.....	166
8.2.2	Caso de estudio B.....	169
8.2.3	Caso de estudio C.....	172
8.2.4	Caso de estudio D.....	175
8.3	<i>Cálculo de las consecuencias</i>	<i>179</i>
8.3.1	Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio A	179
8.3.2	Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio B.....	180
8.3.3	Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio C.....	181
8.3.4	Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio D	182
8.4	<i>Representación gráfica del riesgo</i>	<i>183</i>
8.4.1	Representación del riesgo individual del caso de estudio A	184
8.4.2	Representación del riesgo individual del caso de estudio B	185
8.4.3	Representación del riesgo individual del caso de estudio C	187
8.4.4	Representación del riesgo individual del caso de estudio D	189
8.5	<i>Discusión de resultados</i>	<i>190</i>
Capítulo IX. Conclusiones		193

REFERENCIAS.....	199
ANEXOS.....	213

Lista de tablas

CAPÍTULO II.

Tabla 2.1. Bases de datos mas utilizadas (GUIAR, 2010).....	15
Tabla 2.2. Modelos de consecuencias comúnmente más usados.....	19
Tabla 2.3. Comparación de frecuencias de fallo genéricas entre diferentes bases de datos..	28

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1. Escala usual de comparación.....	70
---	----

CAPÍTULO V

Tabla 5.1. Conjuntos difusos para la variable contratación.....	85
Tabla 5.2. Opinión de los expertos para el primer grupo de variables.	99
Tabla 5.3. Opinión de los expertos de la importancia de las variables del grupo 1.....	101
Tabla 5.4. Expresiones lingüísticas usadas y sus correspondientes valores numéricos.....	102
Tabla 5.5. Respuestas mayoritarias de los expertos en la obtención del peso.	100
Tabla 5.6 Respuestas consistentes de los expertos para el grupo 2 de variables.	106
Tabla 5.7. Pesos finales de las variables.	107
Tabla 5.8. Grados de sensibilidad (Ferraro, 2009).	113
Tabla 5.9. Valores de los factores y del modificador para las tres situaciones.....	114
Tabla 5.10. Índice de sensibilidad del a situación 1 para el primer grupo de variables.....	115
Tabla 5.11. Índice de sensibilidad final para las variables de los primeros tres grupos....	116
Tabla 5.12. Índice de sensibilidad final de los factores del cuatro grupo.....	117

CAPÍTULO VI

Tabla 6.1. Clasificación de funciones de distribuciones de probabilidad.....	124
Tabla 6.2. Correlación entre el valor final, condición de la variable y el rango de incertidumbre asignada para la metodología basada en la simulación de Monte Carlo.....	130
Tabla 6.3. Primeras iteraciones para obtener valores del factor organizacional.....	131

CAPÍTULO VII

Tabla 7.1. Correlación entre el valor final, variables lingüísticas y el valor numérico asignado para la metodología basada en la lógica difusa.	136
Tabla 7.2. Correlación entre el valor final, condición de la variable y el rango de incertidumbre asignada para la metodología basada en la simulación de Monte Carlo.	138
Tabla 7.3. Respuestas del experto de la empresa para las preguntas del factor organizacional.....	139
Tabla 7.4. Valores numéricos obtenidos de la encuesta de la empresa del caso de estudio A.....	140
Tabla 7.5. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio A.....	142
Tabla 7.6. Rangos de incertidumbre obtenidos de la encuesta de la empresa A.....	143
Tabla 7.7. Primeras 5 iteraciones y última de las variables del modelo para el caso de estudio A.	144
Tabla 7.8. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio B.....	146
Tabla 7.9. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio B.	148
Tabla 7.10. Rangos de incertidumbre obtenidos de la encuesta de la empresa B.....	149
Tabla 7.11. Primeras 5 iteraciones y última de las variables del modelo para el caso de estudio B.....	149
Tabla 7.12. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio C.....	152
Tabla 7.13. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio C.....	152

Tabla 7.14. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio C.....	153
Tabla 7.15. Primeras 5 iteraciones y última de las variables del modelo para el caso de estudio C.	154
Tabla 7.16. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio D.....	156
Tabla 7.17. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio D.	156
Tabla 7.18. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio D.....	157
Tabla 7.19. Primeras 5 iteraciones y última de las variables del modelo para el caso de estudio D.	158
Tabla 7.20. Comparación de valores de los modificadores mediante las metodologías propuestas.....	159

CAPÍTULO VIII

Tabla 8.1. Frecuencia inicial y corregida para cada evento de pérdida de contención.....	164
Tabla 8.2. Frecuencias de Accidentes para un ACR normal del caso de estudio A.....	166
Tabla 8.3. Frecuencias de accidente modificadas para el caso de estudio A.....	167
Tabla 8.4. Frecuencia inicial y corregida para cada los LOC del caso de estudio B.....	168
Tabla 8.5. Frecuencias de accidentes para un ACR normal del caso de estudio B.....	169
Tabla 8.6. Frecuencias de accidente modificadas para el caso de estudio B.....	170
Tabla 8.7. Frecuencia inicial y corregida para cada evento de pérdida de contención.....	171
Tabla 8.8. Frecuencias de accidentes para un ACR normal del caso de estudio C.....	172
Tabla 8.9. Frecuencias de los Accidentes finales alteradas por el modificador para el caso de estudio C.....	173
Tabla 8.10. Frecuencia inicial y corregida para cada evento de pérdida de contención...	174
Tabla 8.11. Frecuencias de accidentes para un ACR normal del caso de estudio B.....	175
Tabla 8.12. Frecuencias de los accidentes finales alteradas por el modificador.....	176
Tabla 8.13. Cálculos de la magnitud de las consecuencias del tanque de butano en caso de una liberación instantánea de todo el contenido.....	178

Lista de tablas

Tabla 8.14. Cálculos de la magnitud de las consecuencias del tanque de almacenamiento de etileno criogénico en caso de una liberación instantánea de todo el contenido.....	179
Tabla 8.15. Cálculos de la magnitud de las consecuencias del tanque de almacenamiento de formol en caso de una liberación instantánea de todo el contenido.....	180
Tabla 8.16. Cálculos de la magnitud de las consecuencias para la zona de almacenaje metanol en caso de una liberación instantánea de todo el contenido.....	181

Lista de figuras

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Origen del “Purple Book” (Adaptado de Beerens et al., 2006).....	12
Figura 2.2. Esquema y componentes de un diagrama de árbol de fallos (Pique y Cijalvo, 2010).....	17
Figura 2.3. Ejemplo de un árbol de eventos con datos probabilísticos (INSHT, 1999).	18
Figura 2.4. Representación del riesgo individual (Dujim, 2009)	22
Figura 2.5. Ejemplo de una grafico de riesgo social para una instalación (Bottelberg, 2000).....	23
Figura 2.6. Pasos para realizar un ACR (Adaptado de Ronza, 2007).....	26

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Relación entre las causas de un accidente (factores humanos) y sus causas inmediatas (errores humanos) (Adaptado de Gordon et al., 1996).	35
Figura 3.2. Causas principales de accidentes en las industrias de procesos (Adaptado de Löwe, 2005).	36
Figura 3.3. Factores contribuyentes a los grandes accidentes (Adaptado de Kariuki, 2007).....	36
Figura 3.4. Plataforma petrolífera Piper Alpha antes y después del siniestro (AICHE, 2005).....	40
Figura 3.5. Esquema simplificado de la planta Texaco (Adaptado de Dykes, 1997).....	42
Figura 3.6. Aspectos fundamentales de un sistema de gestión de seguridad (Adaptado de Liou et al., 2008).	45

Figura 3.7. Triángulo de seguridad (Adaptado de Bellamy et al. 2008).....	47
Figura 3.8. Factores del Modelo SHEL (Adaptado de Edwards, 1988).	47
Figura 3.9. Modelo m-SHEL de Kawano (2002).	48
Figura 3.10. Factores causantes de un evento no deseado (Adaptado de Kariuki y Löwe, 2004).....	49
Figura 3.11 Factores humanos causantes de un evento no deseado (Adaptado de Kariuki y Löwe, 2006).	50
Figura 3.12- Modelo del queso suizo (Adaptado de Reasons, 1990).....	51
Figura 3.13. Triángulo de efectividad de Miller et al. (2000).....	52
Figura 3.14. Diagrama de los factores humanos (Adaptado de HSE, 2010).	54

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Ejemplo de la Lógica Difusa comparada con la Lógica Clásica.	60
Figura 4.2. Metodología de la lógica difusa.	61
Figura 4.3. Funciones de pertenencia más comúnmente usadas: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) sigmoïdal y (d) gaussiana (Betrò, 2011).	63
Figura 4.4. Operaciones lógicas entre conjuntos clásicos.	67
Figura 4.5. Operaciones lógicas entre conjuntos difusos.	67
Figura 4.6. Determinación gráfica de los grados de pertenencia.	68
Figura 4.7. Método de implicación mínimo (LabWorks, 2013).	74
Figura 4.8. Método de implicación del “producto” (LabWorks, 2013).	74
Figura 4.9. Representación del método de agregación máxima (MathWorks, 2010).....	75
Figura 4.10. Método del Centroide.	77

CAPÍTULO V

Figura 5.1. Metodología de la lógica difusa.....	81
Figura 5.2. Diseño de las variables del modelo.	82
Figura 5.3. Ejemplo de una función de pertenencia de tipo Z.	87
Figura 5.4. Ejemplo de una función de tipo π	88

Figura 5.5. Elección de la función de pertenencia para conjunto difuso pobre.	90
Figura 5.6. Países de donde se obtuvieron las respuestas del cuestionario.	92
Figura 5.7. Instrucciones del cuestionario.....	93
Figura 5.8. Introducción del tema.....	93
Figura 5.9. Instrucciones de como seleccionar la parte consecuente de cada regla.	95
Figura 5.10. Formación de reglas del primer grupo.	96
Figura 5.11. Formación de reglas del cuarto grupo.	97
Figura 5.12. Instrucciones de llenado para la obtención del peso de las variables.....	98
Figura 5.13. Estudio por pares de variables para obtención del peso.....	98
Figura 5.14. Reglas finales para el tercer grupo de variables.	100
Figura 5.15. Opciones elegidas por los expertos para la comparación de variables.....	103
Figura 5.16. Función de Matlab para la consistencia y el cálculo de los pesos.	105
Figura 5.17. Matrices finales de las respuestas consistentes.	106
Figura 5.18. Elección de método mediante los operadores difusos.....	108
Figura 5.19. Editor de reglas del grupo 3 de variables.....	109
Figura 5.20. Operador para incluir los pesos del grupo 3 de variables.	110
Figura 5.21. Función de Matlab usada para insertar los pesos en el grupo 3.	110
Figura 5.22. Implicación, agregación y defusificación.....	112
Figura 5.23. Grado de sensibilidad de las variables de los primeros tres grupos.....	113
Figura 5.24. Sensibilidad de los factores del cuarto grupo.....	114

CAPÍTULO VI

Figura 6.1. Distribución de variables aleatorias normales (Olivares-Pacheco, 2007).....	125
Figura 6.2. Metodología para la obtención del modificador mediante MC.....	127
Figura 6.3. Representación del modelo con las restricciones.....	128
Figura 6.4. Obtención del modificador por Monte Carlo.....	132

CAPÍTULO VII

Figura 7.1. Preguntas del cuestionario de evaluación de la empresa para la variable “Comunicación e Informe”	135
Figura 7.2. Comparación de la afectación en el Factor Organizacional de la variable subcontratación contra la variable formación.	137
Figura 7.3. Obtención del valor del factor organizacional del caso de estudio A.....	141
Figura 7.4. Obtención del valor del modificador del caso de estudio A por simulación de Monte Carlo.....	144
Figura 7.5. Obtención del valor del factor organizacional del caso de estudio B.....	147
Figura 7.6. Obtención del valor del modificador del caso de estudio B por simulación de Monte Carlo.	150
Figura 7.7. Obtención del valor del modificador del caso de estudio C por simulación de Monte Carlo.	154
Figura 7.8. Obtención del valor del modificador del caso de estudio D por simulación de Monte Carlo.	158

CAPÍTULO VIII

Figura 8.1. Árbol de sucesos de una rotura catastrófica de un depósito de almacenamiento de GLP.....	165
Figura 8.2. Árbol de sucesos para cualquier fuga continua de GLP y etileno criogénico....	165
Figura 8.3. Árbol de sucesos para fuga de sustancias líquidos inflamables.....	172
Figura 8.4. Árbol de sucesos para fugas de sustancias y mezclas líquidas inflamables y tóxicas.....	175
Figura 8.5. Curvas de isoriesgo con y sin modificadores para el caso de estudio A.....	183
Figura 8.6. Curvas de isoriesgo con y sin modificadores para el caso de estudio B.....	184
Figura 8.7. Curvas de isoriesgo con y sin modificadores para el caso de estudio C.....	186
Figura 8.8. Curvas de isoriesgo con y sin modificadores para el caso de estudio D.....	188

ACRÓNIMOS

Acrónimo	Significado
ALOHA	Area of Location Hazards Atmosphere
ACR	Análisis cuantitativo de riesgo
AHP	Analytical Hierachical Process
AQI	Índice de calidad del aire
BASIS	British Airways Safety Information System
BLEVE	Boiling liquid expanding vapor explosion
BSI	British Standard Institution
CCCPS	Center for Chemical Process Safety
COMAH	Control of Major Accident Hazards
DVS	Descomposición de valores singulares
EPA	Environmental Protection Agency
FACTS	Failure and accidents technical information system
FDP	Función de distribución de probabilidad
HSE	Health and Safety Executive
GLP	Gas Licuado de Petroleo

Acrónimos

Acrónimo	Significado
ILO	International Labour Organization
ISRS	International Safety Rating System
LOC	Loss of Containment Event
MARS	The Major Accident Reporting System
MHAU	Major Hazard Assessment Unit
MHIDAS	Major Hazard Incident Data Service
OIT	Oficina Intenacional del trabajo
OSHAS	Occupational Health and Safety Management Systems
RI	Riesgo Individual
RS	Riesgo Social
SHEL	Software, Hardware, Environment y Liveware
SI	Índice de Sensibilidad
SMAT	Small and Medium Atmospheric Tanks
SGSO	Sistema de gestión de la seguridad operacional
SONATA	Summary of Notable Accidents in Technical Acitivities
WOAD	Wordl Offshore Accident Database

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La industria química y sus procesos involucran una gran cantidad de sustancias peligrosas, debido a esto, junto con la rápida industrialización y el aumento de la población, las personas, tanto las que trabajan en el establecimiento como las que viven en sus alrededores, están más expuestas y son más vulnerables a los accidentes derivados de dicha industria. Ramírez (2010) afirma que datos recientes indican que 100000 seres humanos (a nivel mundial) mueren al año por accidentes industriales, 1500000 quedan heridos de gravedad y existen unas 600000 sustancias tóxicas que producen enfermedades graves. La frecuencia de los accidentes no es la misma en todos los sectores de la actividad industrial, debido a su mayor o menor peligrosidad.

La gestión de la seguridad en la industria de procesos es un tema complejo por causa de todas las variables que se tienen que en cuenta. El parámetro llamado riesgo es un término

dedicado a establecer como de segura es una empresa, con el fin de evitar accidentes catastróficos que sean dañinos hacia las personas, bienes materiales y medio ambiente. Debido a las consecuencias que han dejado accidentes graves ocurridos en la historia de la industria como el de Flixborough en el Reino Unido (1974), o el de Seveso en Italia (1976), la evaluación del riesgo se ha hecho indispensable.

El factor humano es considerado como la causa o contribución mayor de los accidentes en muchos tipos de industria como la aviación, marítima, minería o petroquímica. Dentro de la industria química, éste ha sido el causante de accidentes graves como el de Piper Alpha en 1988, el cual se cobró la vida de 167 personas. Aún con los avances que se han registrado en el ámbito de la prevención de accidentes, este factor sigue siendo relevante y digno estudio.

Con la modernización de los procesos, especialmente en la industria química, se ha tratado de disminuir el papel del hombre, esto no significa que éste sea ahora menos importante, ya que es el único capaz de tomar decisiones importantes ante sucesos no previstos, pero sí que se ha intentado automatizar todo aquello que sea posible.

No obstante, el hombre está muy ligado a los procesos tecnológicos de las industrias en cualquiera de sus etapas (diseño, construcción, explotación, mantenimiento, conservación etc), por ello es muy importante estudiar la influencia del factor humano en los accidentes. Cortés et al. (2012) mencionan que el ser humano, en realidad, es el responsable del 100% de los accidentes, ya sea por propia causa humana o por causa técnica. De ahí la necesidad de contar plenamente con el ser humano y conocer sus pautas de conducta de cara a plantear estrategias válidas y efectivas en la prevención de accidentes.

El factor humano es difícil de definir ya que generalmente suele aplicarse a cualquier aspecto relacionado con los seres humanos. Este factor es la parte más flexible, adaptable y valiosa dentro de la industria, pero es también la parte más vulnerable a influencias que pueden afectar negativamente su comportamiento y por lo tanto causar un accidente. Debido a que éste interactúa con muchos factores externos que tienden a modificar su conducta,

lo hace también muy impredecible. Si se quiere disminuir el riesgo está claro que es necesario tener en cuenta este parámetro.

Existe una percepción de que el factor humano es inabordable por la ingeniería debido a su complejidad. Son diversas las ciencias que estudian los comportamientos humanos con diferentes enfoques (psicología, psiquiatría, sociología, medicina humana, etc.). Sin embargo, se necesita integrar todo este conocimiento para el desarrollo de la industria y la prevención de accidentes.

Entender y cuantificar este factor no es tarea sencilla debido a su naturaleza, la cantidad tan amplia de variables que pueden relacionarse cuando se habla de éste y la incertidumbre que ello genera. Por lo tanto, es normal que la industria química deje en algunas ocasiones a un lado este factor por su complejidad de cálculo.

Todo esto llevó a tomar la decisión de incluir este aspecto en la prevención de accidentes. El factor humano es de suma importancia y nuevas metodologías deben surgir para reducir su impacto en los accidentes ocurridos en la industria química. Con base a este argumento, se fijó el objetivo de la tesis presentado a continuación.

1.2 Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta tesis es la inclusión de una de las principales causas de accidentes en la industria química, el factor humano, en una de las herramientas más usadas y efectivas para la reducción de accidentes dentro de esta industria: la evaluación del riesgo.

Para cumplir este objetivo se planteó la creación de un modificador de la frecuencia utilizando dos metodologías que permitan la integración de variables como el factor humano a un sistema y que no sean ajenas al análisis de riesgo: la lógica difusa y la simulación de Monte Carlo. Para poder cumplir este objetivo general fue necesario llevar a cabo los siguientes sub-objetivos:

- Revisión bibliográfica de los parámetros implicados en el análisis de riesgo: frecuencias de los accidentes y estimación de las consecuencias. Evaluación de la importancia de estos parámetros e investigación sobre los diferentes métodos de cálculo para su obtención.
- Estudio del factor humano: su importancia y su influencia en el riesgo en la industria química, tanto en la frecuencia de los accidentes como en la magnitud de las consecuencias.
- Análisis de la teoría de la lógica difusa: comprensión sobre su funcionamiento, su metodología, componentes y como podría incluirse en el análisis del riesgo.
- Estudio de la simulación de Monte Carlo: entender su metodología, aplicaciones y funcionamiento.
- Obtención de la información necesaria para el desarrollo del modelo a través de los expertos por medio de técnicas de recopilación de datos como son las encuestas, cuestionarios, entrevistas y otras fuentes.
- Desarrollo de las metodologías para introducir el factor humano en el análisis del riesgo mediante la lógica difusa y la simulación de Monte Carlo. Así como la creación de un modificador de la frecuencia que incluya el factor humano, creando valores más cercanos a la realidad.
- Aplicación de las metodologías desarrolladas a casos de estudio de diferentes escenarios de riesgo relacionados con instalaciones de almacenamiento de materiales peligrosos.
- Obtención de los resultados y comparación de éstos mediante métodos de análisis de riesgo como es el análisis cuantitativo de riesgo.
- Extracción de conclusiones para la mejora de la evaluación de riesgo en plantas químicas.

1.3 Desarrollo de la tesis

Como el objetivo de la tesis es introducir el factor humano en el análisis de riesgo, primero se ha hecho una amplia investigación acerca del análisis de riesgo en la industria

química (Capítulo II). En especial, se ha estudiado como se lleva a cabo la estimación de las frecuencias, debido a que el modificador que se ha creado afecta directamente a éstas. Por lo tanto, se ha documentado el origen de estas frecuencias que están contenidas en diferentes bases de datos. Las frecuencias de los accidentes, junto con las consecuencias son la base para la estimación del riesgo, así que también se ha investigado y se han presentado los diferentes métodos de cálculo para la evaluación de éste.

El parámetro que ha cambiado la frecuencia de los accidentes y, en consecuencia, el riesgo, es el factor humano, así que se ha realizado un estudio en profundidad acerca de este factor (Capítulo III). Se ha hecho énfasis en la importancia que tiene este factor en la industria química y como ha ido evolucionando hasta tiempos recientes, llegando a ser reconocido como uno de los principales causantes de accidentes. También se señala las diferentes clasificaciones que tiene este factor, lo cual ha servido de base para la construcción del modelo.

Como ya se ha indicado, una de las metodologías aplicadas para la introducción del factor humano a las frecuencias de los accidentes ha sido la lógica difusa. Por lo tanto, se han investigado sus bases y los pasos que se deben seguir para poder utilizarla (Capítulo IV). Debido a que esta metodología se basa en la opinión de los expertos, se construyó un cuestionario en donde expertos internacionales fueron contactados y se pudieron obtener los datos necesarios para el desarrollo de dicha metodología.

Esta metodología ha permitido la creación de un modificador difuso de la frecuencia. Para ello, se construyó un modelo que incluyó tres factores: organizacional, de las características del trabajo y de las características personales. Cada uno de estos factores consta de diferentes variables representando factores humanos los cuales están detallados en el capítulo V. Siguiendo los pasos de la metodología de la lógica difusa propuesta se interpretaron los resultados de la opinión de los expertos, de tal manera que, con todos los datos obtenidos, al cumplir con los pasos de la metodología propuesta obtener el modificador mencionado.

Otra de las metodologías empleadas ha sido la simulación de Monte Carlo. Esta metodología se explica, tanto su funcionamiento como sus aplicaciones en el análisis del riesgo, en el Capítulo VI. A partir de esta técnica, se ha planteado una metodología para la obtención de un modificador de la frecuencia utilizando el mismo modelo de factores humanos propuesto anteriormente.

Para poder probar estas metodologías, se presentan cuatro casos de estudio referentes a cuatro industrias químicas (Capítulo VII). Después, se presenta un método de evaluación del comportamiento de las empresas, el cual se ha utilizado para establecer las condiciones de los factores humanos que han servido como datos de entrada para las metodologías propuestas. Con todo ello, se han obtenido diferentes valores de modificadores para cada caso de estudio.

Los modificadores no afectan sólo a la frecuencia, sino también al riesgo en general. Por lo tanto, con el fin de comparar los resultados con un análisis cuantitativo de riesgo (ACR), se han obtenido las frecuencias finales de los accidentes de las situaciones accidentales propuestas (Capítulo VIII). De la misma manera, se han obtenido sus consecuencias y sus representaciones de riesgo. Así se ha podido comparar la afectación de los modificadores en la frecuencia de los accidentes y en el riesgo en general.

Finalmente, en el Capítulo IX se muestran las conclusiones de la aplicación de ambas metodologías a la estimación del riesgo de accidentes en la industria química.

CAPÍTULO II. EVALUACIÓN DEL RIESGO EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

En este capítulo se introducen varios conceptos para el mejor entendimiento de esta tesis, como el de la evaluación del riesgo, especialmente en el ámbito de la industria química en donde en los últimos años ha tenido un gran auge. Se describen también las partes fundamentales para estimar el riesgo: La obtención de las frecuencias de los accidentes y la magnitud de sus consecuencias. También se hace mención de una de las metodologías más aceptadas para la evaluación del riesgo llamada análisis cuantitativo de riesgo (ACR).

Finalmente, se hace énfasis en la incertidumbre asociada en la obtención del riesgo, la cual está presente en diferentes etapas de la misma, especialmente en la parte de la estimación de frecuencias. Esta incertidumbre puede ser generada por diferentes aspectos como es el factor humano. Para evaluar esta incertidumbre varias metodologías pueden ser utilizadas como la simulación de Monte Carlo o la lógica difusa las cuales también son introducidas en este capítulo.

2.1 Introducción

En el campo de la industria, el riesgo se define como la combinación de la posibilidad o probabilidad de que un evento peligroso (accidente) suceda y de las consecuencias de éste (Hams-Ringdahl, 2004). El aumento y la diversidad de los productos manufacturados producidos por las instalaciones de procesos químicos han significado un incremento en el riesgo. Una de las razones puede ser el hecho de que se necesitan más reactores, tuberías o recipientes en donde se manejan sustancias peligrosas a altas temperaturas o presiones. También el hecho que en estas instalaciones químicas se tratan grandes cantidades de sustancias peligrosas que son procesadas o almacenadas. Por lo tanto, cuando se analiza el riesgo en este tipo de instalaciones, es fundamental evaluar los diferentes tipos de peligros incluyendo los naturales, de proceso, errores humanos, etc.

Hazzam et al. (2006) dictaminaron que las instalaciones químicas son una amenaza para la salud humana debido a que exponen a los trabajadores de la planta, así como a las personas que viven en las cercanías a sustancias químicas, las cuales en su mayoría son dañinas para la salud. La gente que vive o trabaja en los alrededores de este tipo de industria pide mayor protección para ellos mismos o para el medio ambiente. Muchas veces pasa también que las personas que viven alrededor de una planta química no están enterados del riesgo que conlleva vivir ahí.

En la industria es imposible eliminar el riesgo por completo, todos los procesos tienen un cierto riesgo asociado. En algún punto desde la etapa de diseño o posterior, alguien necesita decidir si el riesgo es “aceptable” o no, y así, tomar medidas para minimizarlo. Esta percepción del riesgo puede estar afectada por factores económicos, conocimientos (o falta de ellos), experiencia y muchos otros tipos de factores. Debido a la complejidad de este concepto, el riesgo puede llegar a tener diferentes interpretaciones.

La evaluación del riesgo en las instalaciones químicas se intensificó como resultado de los eventos catastróficos que han ocurrido en los últimos años. Con el rápido crecimiento de la industrialización y de la población, viene también un incremento en las posibles

consecuencias que un accidente pueda tener. Khan et al. (1998) afirmaron que este incremento del riesgo era especialmente preocupante en países del tercer mundo, donde la densidad de la población es muy alta y las áreas industriales están rodeadas por poblaciones de gran tamaño.

Es común también encontrar “áreas industriales” o “complejos industriales” donde diferentes grupos o empresas químicas se encuentran situadas muy cerca entre ellas. La proximidad entre estas industrias contribuye también a que los efectos de un accidente que pueda ocurrir aumenten. Si un incidente ocurre en una de ellas, podría llevar a una cadena de accidentes o un efecto dominó que pueda causar otro accidente en la empresa vecina, esto afectaría a todo el “complejo industrial” o a las poblaciones cercanas.

Es por esto que en las industrias de procesos se han estado desarrollando continuamente métodos y técnicas para poder reducir los peligros que significan un riesgo para la vida de las personas, el medio ambiente y la economía. Estos avances se encuentran principalmente concentrados en la industria de refinería, química y petroquímica, en donde se manejan un amplio espectro de productos peligrosos que son inflamables y/o tóxicos. Coco (2003) y Mannan (2005) afirmaron que a pesar de los esfuerzos para el desarrollo de estas nuevas metodologías, nuevos accidentes catastróficos en este tipo de industria seguían ocurriendo a lo largo de los años; por lo tanto, había que seguir desarrollando metodologías que incrementasen la seguridad de las personas, como la evaluación de riesgo.

Existen varios tipos de técnicas basadas en la evaluación del riesgo, es decir, se puede llevar una evaluación de este tipo por diferentes niveles. La elección del tipo más apropiado de evaluación, entre ellos el ACR, depende de muchos factores, principalmente los que se destacan:

- Objetivo del estudio.
- Número de instalaciones o partes del equipo.
- Recursos disponibles.
- Complejidad de las instalaciones y procesos.

- Naturaleza y calidad de los datos disponibles.

Como ya se ha comentado, los dos pilares base para la estimación del riesgo son: La estimación de las frecuencias y la obtención de sus consecuencias. A continuación se explicaran con más detalle estos conceptos.

2.2 Estimación de la frecuencia de los accidentes

Obtener la frecuencia de los accidentes es una parte fundamental si se quiere saber el riesgo asociado a cualquier industria. Existen valores de frecuencia genéricas de fallo que se toman como una “frecuencia base” y se encuentran en diferentes bases de datos genéricas que a continuación se explican. También existen métodos para la obtener la frecuencia de un accidente como el análisis histórico de accidentes o el árbol de fallos. Si se cuenta con valores de probabilidad utilizando el método de árboles de eventos también se pueden obtener la probabilidad de ocurrencia de estos accidentes.

2.2.1 Bases genéricas de fallos de accidentes

Estas frecuencias de fallo genéricas fueron obtenidas a través de los datos históricos de accidentes en la industria química, nuclear y aeronáutica, entre otras, y en la experiencia propia de los trabajadores y expertos. Lee (2001) estableció que el uso de las frecuencias genéricas se justifica debido a que los equipos de procesos de una planta presentan patrones de baja frecuencia de fallo y, por tanto, no se tiene un historial de fallo que permita algún tipo de análisis estadístico. Así pues, las frecuencias genéricas de accidentes representan un punto de partida en la estimación de la probabilidad de fallo.

Existen diferentes fuentes en donde podemos encontrar estas frecuencias de fallo genéricas tales como:

- Reference Manual Bevi Risk Assessment (Gobierno Holandés) (Bevi, 2009)
- Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments (Health and Safety Executive del Gobierno Británico) (HSE,2010)
- The Handbook of failure frequencies (Flemish Government, 2010)

Dependiendo el país o la zona en donde se realizan las evaluaciones del riesgo, unas fuentes pueden ser más usadas que otras. Un problema que se presenta en el uso de diferentes bases de datos de estas frecuencias genéricas es que cada una de ellas tiene una forma diferente de clasificar los escenarios.

Otra de las problemáticas del uso de frecuencias de fallo genéricas es que los datos utilizados puede ser que no se refieran a una aplicación, actividad o escenario en específico. El “*Center for Chemical Process Safety*” (CCPS, 1998) estableció que eso puede ser frustrante para el dueño u operador, porque matemáticamente hablando no existe una justificación para mejorar el diseño, mantenimiento o inspección para reducir el riesgo debido a que no se puede demostrar que la frecuencia pueda ser reducida.

Sucede también que al comparar las frecuencias de entre las diversas fuentes, estas sean diferentes, cambiando incluso en más de un orden de magnitud o bien que los escenarios no sean comparables. Esta diferencia se puede atribuir a los factores que se han tomado en cuenta para su cálculo. A continuación, se explica con más profundidad el origen de estas bases de datos de fallos genéricas:

2.2.1.1 Reference Manual Bevi Risk Assessment

Esta base de fallos genéricos es comúnmente conocida como “BEVI” y es quizás la base de datos utilizada por más países. El BEVI es parte de un documento llamado “*Purple Book*” el cual fue creado con el fin de regularizar una metodología general para evaluar el riesgo en los Países Bajos.

Como se puede observar en la figura 2.1, el origen del “*Purple Book*” se remonta a informes de las autoridades británicas de energía nuclear de Phillips y Warick (1975), Bush (1975) y Smith y Warwick (1974). Estos informes junto con los datos de frecuencias genéricas obtenidas por la empresa AKZO dieron origen al estudio COVO (1981) que tenía como objetivo mejorar la seguridad de la región de Rotterdam, por lo que se implementó a 6 instalaciones que almacenaban grandes cantidades de materiales peligrosos.

El estudio COVO se actualizó y fue a dado conocer como IPO (1994). Las principales modificaciones de la primera con respecto la segunda fueron la manera de clasificar los escenarios de una rotura catastrófica con: liberación instantánea de todo el contenido, liberación continua con un diámetro mayor de 50 mm y liberación continua durante 10 min.

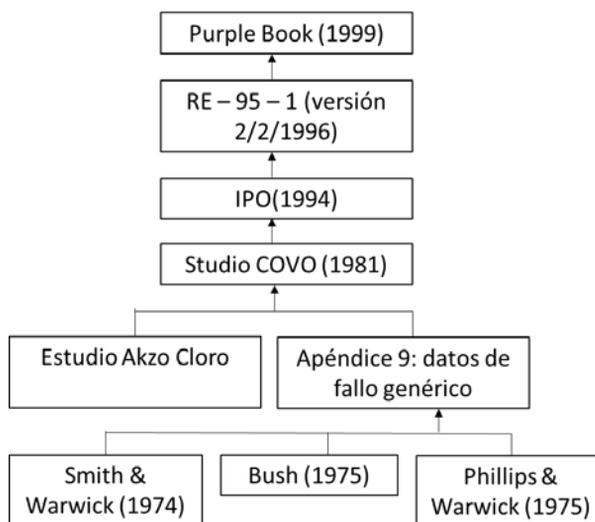


Figura 2.1 Origen del “Purple Book” (Adaptado de Beerens et al., 2006).

Una última modificación se hizo para unificar la liberación continua con diámetro mayor de 50 mm y la liberación continua durante 10 min, de esta manera se creó la RE-95-1 (1996). Cuando la Comunidad Europea creó la directiva SEVESO, destinada a la prevención y respuestas de emergencia en caso de un accidente grave, el documento pasó a ser llamado “*Purple Book*”.

2.2.1.2 Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments

Casi al mismo tiempo que el gobierno de los Países Bajos fue creando sus bases de datos hasta llegar al “*Purple Book*”, los expertos de la “*Health and Safety Executive*” (HSE) del Reino Unido crearon las suyas basadas en diferentes estudios. Esto se hizo mediante la creación de la “*Major Hazards Assessment Unit*” (MHAU) quienes se encargaron de

recopilar información disponible principalmente de la industria nuclear. Sus bases de datos tuvieron casi los mismos orígenes que el BEVI ya que se basaron también en el estudio COVO (1981). A diferencia con otras bases de datos, la HSE hace modificaciones constantes en sus bases de datos. El documento donde se encuentran contenidos estos valores de frecuencias genéricas es el “*Failure Rate and Event data for use within Risk Assessments*” (HSE, 2010).

Las clasificaciones de los eventos que utiliza la HSE son diferentes al BEVI, ya que éste depende del tipo de equipo que se está analizando. Por ejemplo, un tipo de equipo con datos de frecuencia genérica disponible son los relacionados a los SMAT (*Small and Medium Atmospheric Tanks*), que son tanques atmosféricos con una capacidad menor a 450 m³. Para este tipo de equipos, la clasificación de datos se basa en el tipo de fuga (catastrófica, mayor o menor) que también puede cambiar según el tipo de orificio (mayor o menor).

2.2.1.3 The Handbook of failure frequencies

Esta base de datos es la más reciente a diferencia de las anteriores. El Flemish Government en 1994 creó una directiva llamada “*Handboek Kanscijfers*”, en donde se describían diferentes frecuencias de fallo para diferentes partes de una instalación con el objetivo de ser usadas por los expertos cuando realizaran un informe de seguridad.

En el 2002 se publicó otra directiva “*Actualisatie van de AMINAL-richtlijn voor het gebruik van faalkansen bij het opstellen van veiligheidsrapporten*”. Esta directiva enumeraba nuevas frecuencias de fallo para otro número limitado de instalaciones. En el 2004 la directiva del 1994 y la del 2002 se combinaron para crear un nuevo documento llamado “*Handboek Kanscijfers 2004*”. En 2007 se creó un proyecto el cual tenía como objetivo obtener frecuencias de fallo más actualizadas para diferentes instalaciones, como consecuencia de este proyecto y después de consultar diferentes informes de seguridad y establecimientos SEVESO, se creó el “*Handbook on Failure Frequencies 2009*” (Flemish Government, 2010) que es el usado actualmente.

Al igual que el BEVI, este documento clasifica los accidentes según las características del evento (liberación instantánea de todo el contenido, liberación de todo el contenido en 10 minutos a corriente continua y constante). Sin embargo este manual incluye otra clasificación en el evento de liberación instantánea de todo el contenido que depende del tamaño de la fuga.

El manual presentado por el Flemish Government clasifica el tamaño de la fuga en:

- Fuga pequeña: Si el diámetro máximo de la fuga es menor o igual a 10 mm.
- Fuga mediana: Si el diámetro máximo de la fuga está en el intervalo de 10 a 50 mm.
- Fuga grande: Si el diámetro máximo de la fuga es mayor o igual a 50 mm.

Estos valores de frecuencia se toman directamente como un valor fiable, sin embargo existen otros métodos para obtener un valor de frecuencia como los presentados a continuación.

2.2.2 Análisis histórico de accidentes

Es una técnica dedicada a la de búsqueda de información de accidentes industriales en el pasado. Casal et al. (2001) establecieron que esta técnica era esencialmente un análisis cualitativo, pero que permitía también obtener resultados numéricos o cuantitativos si el número de accidentes a analizar era lo suficientemente grande. Usando esta técnica, Oggero et al. (2005) utilizaron un estudio de 1932 accidentes involucrados en el transporte de materiales peligrosos para obtener datos de frecuencia, Darbra y Casal (2004) los obtuvieron a partir de 471 accidentes ocurridos en puertos.

El análisis histórico utiliza las bases de datos como fuente de información. Estas fueron creadas para responder a la necesidad de saber las causas, circunstancias, evolución y consecuencias de un accidente. Así como las medidas tomadas en accidentes industriales pasados. También son útiles para conocer las pérdidas humanas y económicas que ocasionaron estos incidentes. Las bases de datos de accidentes más comunes se presentan en la tabla 2.1 junto con sus principales características. Una de las ventajas de esta metodología

es que se refiere a accidentes que realmente han ocurrido y no en suposiciones. Sin embargo, algunas de las bases de datos existentes no incluyen todos los datos necesarios, y en muchos casos la información no está completa.

Tabla 2.1 Bases de datos mas utilizadas (GUIAR, 2010).

Nombre	Periodo y número de casos registrados	Tipos de accidentes	Observaciones
OSIRIS -1	3 000 casos (1970 - 1990)	Transporte de sustancias peligrosas	País: Italia Datos: Por fax o disquete Idioma: Inglés
OSIRIS - 2	2500 casos (1977 - 1992)	Hidrocarburos	País: Italia Datos: Por fax o disquete
MHIDAS	5330 casos Datos desde 1966	Sustancias peligrosas: almacenamiento, transporte y procesos enfocadas para instalaciones petroquímicas	País: Reino Unido Datos: CD Idioma: Inglés
FACTS	1500 casos Creado en 1980, datos desde 1930-1993	Sustancias peligrosas: almacenamiento, transporte, carga y descarga	País: Holanda Datos: Disquette Idioma: Inglés
WOAD	Creado en 1983	Accidentes en plataformas petrolíferas	País: Noruega
SONATA	2500 casos Mayoría entre 1960-1980, resto entre 1930-1960	Sustancias peligrosas: almacenamiento, transporte, carga y descarga	País: Italia Idioma: Inglés
MARS	3 000 casos (1970 - 1990)	Transporte de sustancias peligrosas	Organismo: Major Hazard Accident Bureau (MHAB) Idioma: Inglés

2.2.3 Árboles de fallos

Otra técnica para la obtención de frecuencias es el árbol de fallos que se hizo popular en la industria de procesos químicos debido al éxito que tuvieron en la industria nuclear, en donde estos tipos de árboles fueron usados para hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de los peligros y riesgos asociados a este tipo de industria. Mullet et al. (2010) describieron que es una técnica deductiva que se aplica a un sistema para la identificación de los sucesos o cadena de sucesos que pueden conducir a un incidente no deseado, en general a un accidente o fallo del sistema. Esta técnica permite cuantificar la probabilidad o frecuencia con que se puede producir un suceso.

La técnica de árboles de fallos consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del álgebra Booleana y permite determinar la expresión de sucesos complejos en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen. De esta manera se puede apreciar, de forma cualitativa, qué sucesos son menos probables porque requieren la ocurrencia simultánea de numerosas causas.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado suceso “top” en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos. Pique y Cijalvo (2010) describieron cada uno de los sucesos que pueden estar involucrados en un árbol de fallos:

- Suceso final. El que ocupa la parte superior de la estructura lógica que representa el árbol de fallos. Es el suceso complejo que se representa mediante un rectángulo.
- Sucesos intermedios: Son los sucesos que se encuentran en el proceso de descomposición y que, a su vez, pueden ser de nuevo descompuestos. Se representan en el árbol de fallos en rectángulos.
- Sucesos básicos: Son los sucesos terminales de la descomposición. Pueden representar cualquier tipo de suceso: sucesos de fallo, error humano o sucesos de éxito. Se representan en círculos en la estructura del árbol.
- Sucesos no desarrollados. Existen sucesos en el proceso de descomposición del árbol de fallos cuyo proceso de descomposición no se prosigue, bien por falta de información, bien

porque no se considera necesario. Se representan mediante un rombo y se tratan como sucesos básicos.

Todos estos sucesos están representados por símbolos característicos de este tipo de árboles, en la figura 2.2, una ejemplificación de un árbol de fallos.

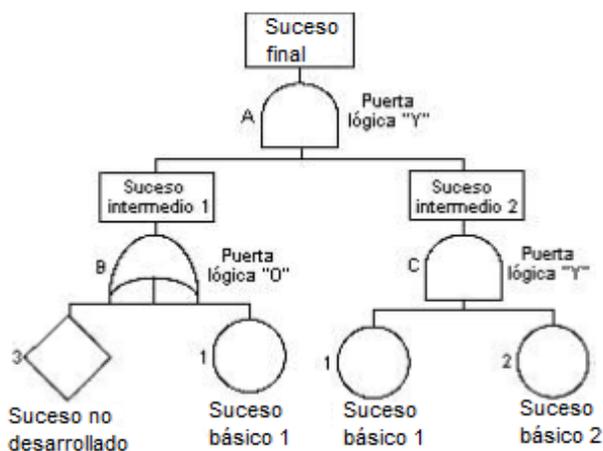


Figura 2.2. Esquema de un diagrama de árbol de fallos (Pique y Cijalvo, 2010)

2.2.4 Árboles de sucesos con datos de probabilidad

Esta metodología es otra de las técnicas para el desarrollo de estudios de seguridad que aplican sistemas de árboles para considerar las cadenas causales de acontecimientos que llegan finalmente a un accidente. Bestraten (1999) afirmó que ésta es una técnica inductiva de tipo cualitativo y cuantitativo, un poco más compleja que el árbol de fallos, debido a que incorpora el análisis probabilístico.

El objetivo del árbol de sucesos es la identificación de las cadenas de sucesos que siguen a un suceso iniciador. Se diferencia de la técnica de árbol de fallos en que este persigue el análisis en profundidad de las causas que provocan dicho suceso iniciador. Por ello normalmente ambos métodos se utilizan de forma complementaria en el análisis de accidentes.

El árbol de sucesos es una forma de estudiar las secuencias de un accidente, ya que relacionan cada suceso iniciador con la secuencia de propagación temporal de los sucesos que están en el origen de las consecuencias de un accidente. Se construye a partir de un suceso iniciador. Este árbol incluye éxitos y fallos de las funciones previstas, conectando dicho iniciador con las posibles consecuencias finales. Cada rama del árbol representa una línea de evolución que conduce a un efecto final. En la figura 2.3 se muestra una representación de un árbol de sucesos con datos probabilísticos.

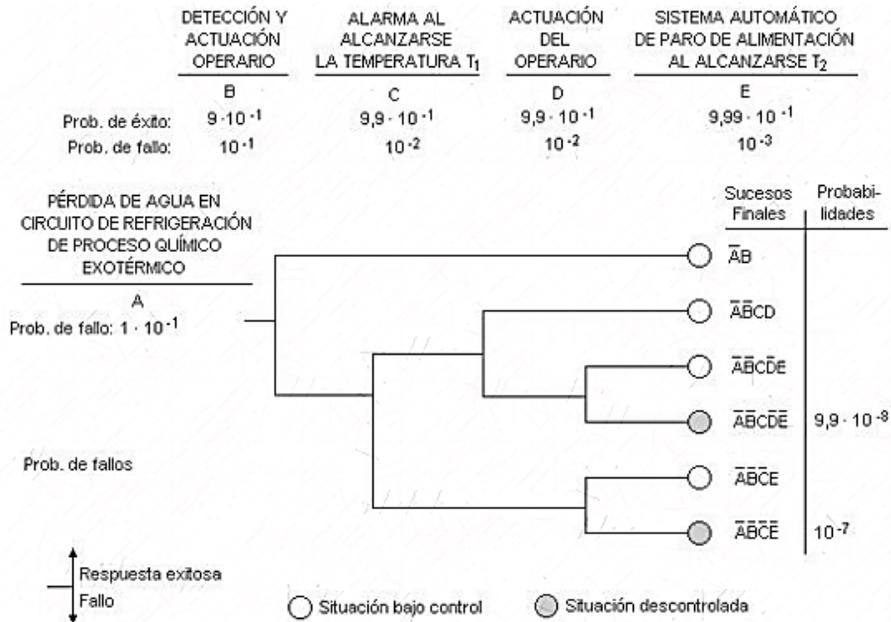


Figura 2.3. Ejemplo de un árbol de sucesos con datos probabilísticos (INSHT, 1999).

Una vez vistas las fuentes de las frecuencias, se comentará brevemente la parte de la estimación de las consecuencias, si bien esta tesis se centra en el análisis de las frecuencias.

2.3 Estimación de la magnitud de las consecuencias de los accidentes

Después de la cuantificación de las frecuencias, es necesario obtener la magnitud de los efectos y consecuencias del accidente para poder estimar el riesgo. La elección del modelo

de consecuencias depende del tipo de accidente que se está estudiando. Un típico modelo de efectos del accidente incluye la descripción del orificio de fuga, tiempo ocurrido del suceso y el estado de los materiales involucrados (sólido, líquido, vapor o combinación).

Si el tipo de accidente es una dispersión se debe usar un modelo de dispersión para determinar como el material fue dispersado y a qué niveles de concentración. Si el tipo de accidente es un incendio, el efecto que se debe medir es la radiación térmica. Si es una explosión, el efecto que se debe de tomar en cuenta es la sobrepresión generada. En la tabla 2.2 están representados los modelos más comunes así como el efecto que se mide dependiendo del tipo de accidente.

Tabla 2.2. Modelos de consecuencias comúnmente más usados.

Tipo de accidente	Efecto medido	Modelo
Incendio	Radiación térmica	Modelo de llama sólida (Casal, 2007)
Explosión	Sobrepresión	Método TNT (Dewey, 1964) Ley de Hopkinson (Ismail y Murray, 1996)
*BLEVE	Radiación térmica Sobrepresión Fragmentos	Método TNT (Dewey, 1964) Modelo de llama solida (Casal, 2007) Ley de Hopkinson (Ismail y Murray, 1996)
Dispersión	Concentración Distribución	Ecuaciones de Britter y McQuab (Britter y McQuab, 1968) Dispersión del Gas Denso (Mohan et al., 1995) Modelo Gaussiano (Turner, 1994)

*Bleve: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.

Las consecuencias de un accidente son estimadas determinando la intensidad de sus efectos según la distancia sobre la cual son apreciadas, identificando también la distribución de los elementos vulnerables afectados. Esto se puede hacer mediante modelos de vulnerabilidad, los cuales muestran la relación entre la intensidad de un efecto y el grado del daño causado a cierto objetivo (Casal, 2007).

Para hacer una estimación de las consecuencias, se requiere una función. Esta función debe de relacionar la magnitud del impacto, por ejemplo, la radiación térmica causada por un dardo de fuego, con el grado de daño causado por el accidente. El método más

comúnmente usado, considerado como un modelo de vulnerabilidad, es el análisis probit, el cual relaciona la variable probit con la probabilidad. Cameron y Raman (2007) establecieron que la variable probit “Y” se puede estimar mediante una expresión como la siguiente:

$$Y = k_1 + k_2 \cdot \ln(V_1) \quad [2.1]$$

Donde Y es la variable probit, V_1 es la medida del efecto del daño (dosis) y k_1 , k_2 son constantes específicas dependiendo del accidente ocurrido. Después de obtener las frecuencias y las consecuencias de un accidente, el riesgo puede ser obtenido como se explica a continuación.

2.4 Obtención del riesgo

Como ya se mencionó en la definición de riesgo, este parámetro se puede obtener por medio de la estimación de las frecuencias y del efecto de las consecuencias. Una vez presentados los antedichos parámetros, en esta sección se introduce la representación gráfica del riesgo. Éste se puede representar gráficamente mediante el riesgo individual (RI) o el riesgo social (RS). El RI puede ser obtenido mediante curvas de iso-riesgo las cuales son una medida gráfica para representar el riesgo que representa una planta de procesos. El RI, para un punto-ubicación alrededor de una actividad peligrosa, es definido como la probabilidad de que una persona promedio sin protección, permanentemente presente en una ubicación o punto en específico, muera debido al accidente provocado por la actividad peligrosa (Bottelberg, 2000). El RI, por lo tanto, es una propiedad del lugar donde se realiza la actividad y es muy importante en términos de planificación geográfica.

De acuerdo con Jonkman (2003) el riesgo individual puede ser cuantificado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$RI = P_f \cdot P_{df} \quad [2.2]$$

En donde P_f es la probabilidad de fallo y P_{df} es la probabilidad de que un individuo muera a causa del fallo, asumiendo que el individuo permanece y se mantiene desprotegido durante todo el evento.

Otra manera de cuantificar el riesgo individual puede ser en función de la frecuencia y la probabilidad (Casal, 2007)

$$RI = f_i \cdot P_{fi} \quad [2.3]$$

Donde f_i es la frecuencia de ocurrencia de un escenario peligroso (años^{-1}) y P_{fi} es la probabilidad de que el escenario del accidente resulte en una fatalidad en una ubicación específica. El valor se obtiene aplicando los modelos de los efectos y los modelos de vulnerabilidad.

El RI es dependiente de la posición geográfica y se muestra en forma de curvas de iso-riesgo en un mapa geográfico donde se encuentren las instalaciones. Por lo tanto, el riesgo individual no es característico para una persona, sino para una ubicación para la cual es calculada.

El contorno de estas curvas de iso-riesgo nos da el riesgo del lugar delimitado, independientemente de que haya o no personas en éste. El perímetro de riesgo o curvas de iso-riesgo conecta todas las ubicaciones geográficas alrededor de una actividad peligrosa con un mismo riesgo individual. Existen diferentes curvas de isoriesgo en donde se representa el riesgo de que un individuo este expuesto a un accidente fatal cada cierta cantidad de tiempo, medida en años. Por ejemplo: la curva cada 10^{-6} año^{-1} traza el alcance en el cual una persona ajena a la planta sufriría una fatalidad cada 10^6 años, esta curva también marca el criterio de aceptabilidad de las curvas de isoriesgo según el “*purple book*” (Instrucción 14/2008 SIE, 2008)

Este método es la manera más común y clara para producir representaciones gráficas del riesgo sobre un área (Casal, 2007). En la figura 2.4 se puede ver un ejemplo de un mapa de curvas de iso-riesgo representando el riesgo individual.

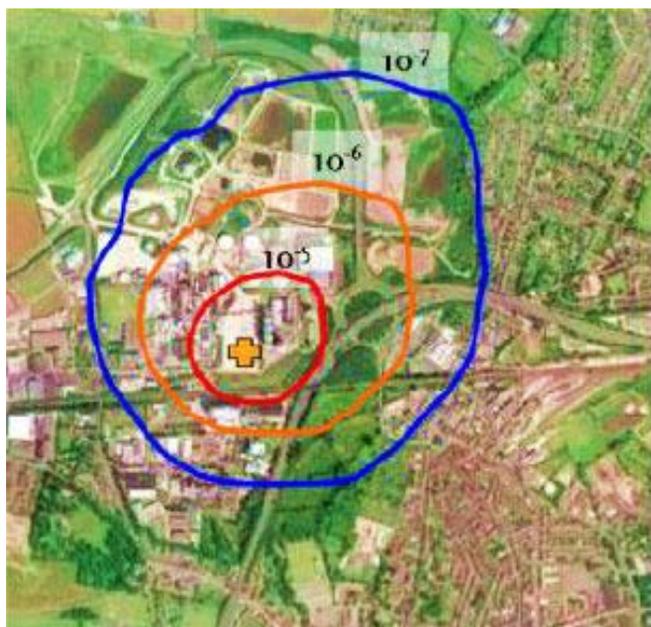


Figura 2.4. Representación del riesgo individual (Dujim, 2009)

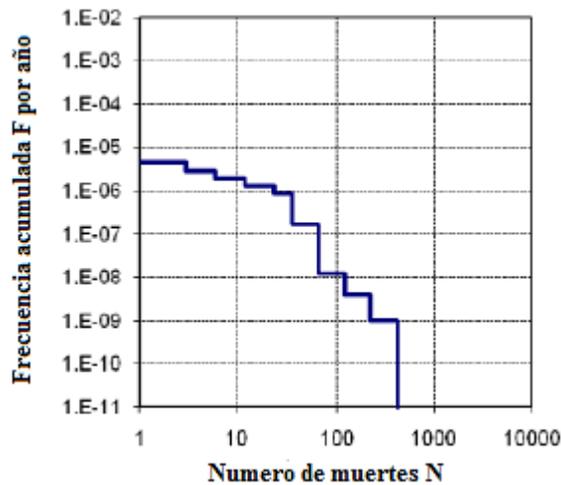
Otra forma de representación del riesgo es el riesgo social (RS), el cual está definido como la probabilidad de que un grupo de personas (N) pueda ser afectado fatalmente debido a un accidente de una actividad peligrosa (Bottelbergh, 2000).

Ichem (1985) definió el riesgo social como “La relación entre la frecuencia y el número de personas que sufren un nivel específico de daño en una población determinada”. Se considera que el riesgo individual da la probabilidad de morir en un determinado lugar, en cambio, el riesgo para la sociedad da un número para toda una zona, no importa precisamente donde se produce el daño (Jonkman, 2003).

Bottelbergh (2000) estableció que el riesgo social puede ser obtenido en función de las viviendas o edificios que se encuentran alrededor de las instalaciones mediante la ecuación 2.4, en donde RS es el riesgo social, RI es el riesgo individual y h es el número de edificios en una localización (x, y) .

$$RS = \int RI(x, y) \cdot h(x, y) dx dy \quad [2.4]$$

Jonkman (2003) también afirmó que el riesgo social se puede representar en curvas tipo F, N (Figura 2.5), en donde la frecuencia (año⁻¹) se representa frente al número de personas muertas debido al accidente en la instalación. Por lo tanto, puede ser posible que, si no existen personas presentes en donde se desarrolla la actividad peligrosa, el riesgo social sea nulo, mientras el riesgo individual podría ser alto.



2.5 Análisis cuantitativo de riesgo (ACR)

Internacionalmente, en la industria de procesos químicos, existe una tendencia gradual positiva para el uso del ACR. Gentile et al. (2004) afirmaron que, en el momento de su estudio, sólo unas pocas metodologías desarrolladas entre los años 50 a 80 eran usadas y aceptadas para el análisis de prevención de pérdidas, hecho que hoy en día continúa vigente. Estos autores mencionan que estas metodologías aceptadas van desde herramientas simples basadas en sistemas de puntuación (p.e., índice de incendios y explosiones Dow) (, hasta herramientas complejas que analizan muchos tipos de variables (p.e., análisis cuantitativo de riesgo, análisis de árboles de eventos).

El análisis de riesgo es una herramienta clave en la toma de decisiones moderna, tanto para el gobierno como para la industria. Aunque en muchos países no sea obligatorio o regulado por el gobierno, el análisis cuantitativo de riesgo (ACR) es la herramienta preferida para la evaluación de riesgo ya que está basada en la estimación de la frecuencia del accidente y de sus consecuencias, como ya se ha indicado anteriormente.

El ACR es un método que identifica que parte del sistema de la operación, ingeniería o gestión puede ser modificado para reducir el riesgo. La complejidad del ACR depende de los objetivos del estudio y de la información disponible. El método del ACR está diseñado para proveer a los analistas una herramienta que les ayude a evaluar el riesgo total de un proceso. Crowl et al. (2002) estableció que estos análisis cuantitativos son usados para evaluar los riesgos potenciales cuando los métodos cualitativos no son capaces de proveer un adecuado entendimiento del riesgo.

Este método es especialmente efectivo para la evaluación de estrategias para reducir el riesgo ya sea desde la etapa de diseño para nuevas instalaciones o para las ya existentes. Para las existentes, es común una evaluación para implementar mejoras, ya sea por la política de la empresa o por regulaciones internacionales/nacionales. Por lo tanto, la precisión del ACR es de vital importancia, ya que este análisis puede influenciar en que tan extenso y costoso puede llegar a ser un proyecto de mejora de la instalación.

El ACR ha sido aceptado por diferentes tipos de industrias como la nuclear, plantas de procesos químicos, industrias de estructuras o espaciales como una metodología para analizar los escenarios peligrosos y cuantificar el riesgo. Casal (2007) estableció que el ACR consiste en una serie de metodologías para cuantificar el riesgo basado en términos de pérdidas humanas o en algunos casos de pérdidas económicas. Esta herramienta también proporciona una aproximación avanzada que puede ser considerada como una etapa adicional hacia una industria más segura.

Crowl et al. (2002) indicó que las principales características que cualquier estudio de ACR debe incluir son las siguientes:

- 1) Definir la secuencia de eventos y posibles incidentes.
- 2) Evaluación de las consecuencias de los incidentes (las herramientas típicas de esta etapa incluyen modelos de dispersión, de incendio y de explosión).
- 3) Estimación de la frecuencia de los incidentes usando arboles de sucesos y árboles de fallos
- 4) Estimación de los efectos de los incidentes en las personas, el medio ambiente y los bienes.
- 5) La estimación del riesgo mediante la combinación de los impactos y las frecuencias, y registrarlo usando elementos gráficos.

Ronza (2007) estableció que para realizar un ACR es necesario seguir una serie de pasos, los cuales se muestran esquematizados en la figura 1.6.

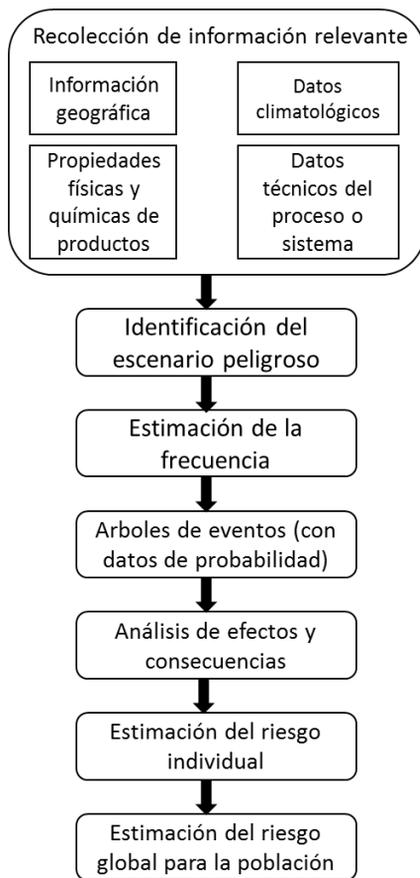


Figura 2.6. Pasos para realizar un ACR (Adaptado de Ronza, 2007)

Todos los pasos para realizar un ACR son importantes, sin embargo se pueden simplificar en 3 etapas básicas: La estimación de frecuencia de los accidentes, el cálculo de la magnitud de las consecuencias y la obtención del riesgo representado gráficamente. En todas estas etapas existe un grado de incertidumbre el cual no se puede eliminar, pero si reducir; a continuación, se introduce el concepto de incertidumbre presente en la evaluación del riesgo.

2.6 Incertidumbre en la evaluación del riesgo

Además de la complejidad asociada a un análisis de riesgo completo, la incertidumbre está presente en varias partes de dicho análisis, tanto en el cálculo de la frecuencia, como en

el cálculo de la magnitud de las consecuencias. Debido a la gran cantidad de modelos de consecuencias existentes dependiendo del tipo de accidente, en esta tesis sólo se analiza la incertidumbre en la parte de las frecuencias.

Dentro de la estimación de las frecuencias de los accidentes, un tipo de incertidumbre se debe a la variabilidad de los datos. Un ejemplo de este tipo de incertidumbre se puede dar debido a las diferencias de frecuencias genéricas entre las diferentes bases de datos. Como se mencionó en la sección 2.2.1 de este capítulo, que el sistema de clasificación de eventos es diferente entre ellas e incluso los valores pueden ser diferentes aunque se encuentren en una misma clasificación.

Para demostrar esto en la tabla 2.3 se presentan los valores de frecuencia para el escenario específico de “Tanques de almacenamiento presurizados no enterrados”. En la situación de la liberación de todo el contenido en 10 minutos de forma continua y constante, se obtienen dos valores diferentes según la fuente: $5 \cdot 10^{-7}$ (Bevi, 2009) y $3,20 \cdot 10^{-7}$ (Flemish Government, 2009). Para este caso no se encuentran valores en la base de datos del Gobierno Británico (HSE, 2010).

En el caso de la liberación instantánea de todo el contenido se puede observar una diferencia mayor de entre las bases de datos anteriores: $5 \cdot 10^{-7}$ (Bevi, 2009) y $1,10 \cdot 10^{-6}$ para fuga mediana (Flemish Government, 2009). Como para estos ejemplos, la frecuencia varía para otros tipos de escenarios y situaciones.

Tabla 2.3. Comparación de frecuencias de fallo genéricas entre diferentes bases de datos

Escenario	Características de la situación	Características Adicionales	BEVI	Gobierno Flamenco	HSE
Tanques de almacenamiento presurizados no enterrados	Liberación instantánea de todo el contenido	Catastrófico	$5 \cdot 10^{-7}$	Fuga Pequeña $1,20 \cdot 10^{-5}$ Fuga Mediana $1,10 \cdot 10^{-6}$ Fuga Grande $1,10 \cdot 10^{-6}$	**Arriba $6 \cdot 10^{-6}$ En medio $4 \cdot 10^{-6}$ Abajo $2 \cdot 10^{-6}$
	Liberación de todo el contenido en 10 minutos de forma continua y constante		$5 \cdot 10^{-7}$	$3,20 \cdot 10^{-7}$	N.D

* N.D: No disponible.

**Arriba, en medio y abajo se refiere a la posición de la fuga

La razón de la diferencia de los valores entre las bases de datos se debe a los factores que se han tenido en cuenta para su cálculo, muchas veces aspectos como la corrosión o el factor humano no están explícitamente incluidos.

Otro tipo de incertidumbre presente en el análisis de riesgo es debida a la información imprecisa, ambigua o incompleta de las variables, muchas veces creada por la naturaleza de las mismas. Makowski y Mannan (2009) indicaron que la evaluación del riesgo está caracterizada por la presencia de incertidumbre implícita en las variables. En la estimación de la frecuencia de los accidentes existen variables que pueden originar este tipo de incertidumbre.

Para poder tratar esta incertidumbre, existen diferentes metodologías usadas para la evaluación de la incertidumbre como la simulación de Monte Carlo o la lógica difusa, conceptos que son introducidos a continuación.

2.6.1 Lógica Difusa

Esta metodología fue investigada por primera vez a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley por el ingeniero Lofty A. Zadeh, el cual, inicialmente, la llamó “principio de la incompatibilidad” de acuerdo con la siguiente idea: conforme la complejidad

de un sistema aumenta, nuestra capacidad de ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta el umbral más allá del cual la precisión y el significado de sus características son excluyentes (Zadeh, 1965).

La lógica difusa sirve para la cuantificación de la incertidumbre debido a la imprecisión o falta de información de los datos. Esta teoría se asemeja más a la razón humana en el uso aproximado de la información y en la inclusión de la incertidumbre para generar decisiones. La mayor contribución de esta teoría es su habilidad de representar datos que son ambiguos o vagos mediante “razonamientos humanos” de una manera precisa. Rousseua (1995) dijo que estos razonamientos humanos pueden ser de mucha ayuda para resolver problemas ingenieriles a través de la introducción de los conocimientos de los expertos en el sistema. Esta metodología se explica de manera más extensa en el capítulo IV de esta tesis.

2.6.2 Simulación de Monte Carlo

El método de Monte Carlo conocido también como simulación de Monte Carlo está atribuido a Stanislaw Ulam y a John von Neumann en la década de 1940. Ellos aplicaron los conceptos generales del método en la investigación de la bomba atómica durante la segunda guerra mundial. El nombre “Monte Carlo” proviene de Mónaco, conocida como la capital del juego del azar, debido a que el juego de la ruleta era considerada como el primer generador de números aleatorios.

Es una técnica que es utilizada en diferentes campos, como los de finanzas, gestión de proyectos, energía, manufacturación, ingeniería, investigación y desarrollo, seguros, petróleo y gas, transporte y medio ambiente. Meri y Zundr (2000) establecieron que ésta es una técnica de simulación numérica que sirve para generar variables aleatorias y evaluar la incertidumbre en sistemas complejos en diferentes campos de las ciencias.

El concepto básico de este método parte de la probabilidad, debido a que plantea conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento, que se obtiene realizando el experimento un número suficiente de veces y determinando la variable aleatoria dependiente como una

función de densidad de los resultados obtenidos en los “experimentos” realizados (Crespo, 2002). La simulación de Monte Carlo proporciona, con la creación de un modelo, la respuesta de posibles resultados mediante la sustitución de un rango de valores (representados por una distribución de probabilidad) para cualquier factor con incertidumbre. Luego calcula los resultados una y otra vez, cada vez usando un grupo diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad. Para completar una simulación de Monte Carlo puede ser necesario realizar miles o decenas de miles de recálculos, dependiendo de la cantidad de incertidumbre y de los rangos especificados. Esta metodología se explica con detalle en el capítulo VI de esta tesis.

Una de las principales fuentes de incertidumbre en el análisis de riesgo es el factor humano, especialmente en la estimación de la frecuencia de los accidentes. Este es un concepto difícil de definir ya que generalmente suele aplicarse a cualquier aspecto relacionado con los seres humanos. Este factor es la parte más flexible, adaptable y valiosa dentro de la industria, pero es también la parte más vulnerable a influencias que pueden afectar negativamente a su comportamiento y, por lo tanto, causar un accidente. Si se quiere disminuir el riesgo está claro que es necesario tomar en cuenta este parámetro utilizando las herramientas necesarias para su cuantificación. En el siguiente capítulo 4 se explica más exhaustivamente el factor humano y su afectación en el análisis de riesgo.

CAPÍTULO III- FACTORES HUMANOS

En este capítulo se introduce el concepto del “Factor Humano”, el cual como ya se ha mencionado anteriormente es una causa importante de incertidumbre en el análisis de riesgo. También se menciona la importancia que tiene en diferentes tipos de industria, especialmente en la química. Se hace un análisis del papel que ha tenido este factor en varios accidentes graves registrados en la historia de la industria. Finalmente, se estudian varios modelos que analizan el origen de éste factor y su relación con el análisis del riesgo. Finalmente se mencionan diferentes clasificaciones que se tienen de éste para varios tipos de industrias y organizaciones.

3.1 Introducción

En los últimos años, el factor humano ha sido considerado cada vez más importante en la determinación de la causa de los accidentes. Una comprensión adecuada de los factores humanos en el lugar de trabajo es una parte importante para la prevención de los accidentes. Algunos estudios han indicado que los factores humanos son una de las principales causas de las lesiones y accidentes en los lugares de trabajo. Vílchez et al. (1995) establecieron que el factor humano es la tercera causa principal de accidentes en la industria química. Skogdalen y Vinnem (2006) determinaron que los errores causados por factores humanos han sido la causa de los mayores accidentes en la historia de la industria.

Muchos de los grandes accidentes han sido atribuidos como causa primaria a los factores humanos. Diversas estadísticas han mostrado que en la industria de procesos químicos, el error humano ha sido la causa de accidentes en un 60 a 90% (McCafferty, 1995). En la industria petroquímica en donde la automatización de los procesos es muy alta, se le atribuye al error humano la causa de aproximadamente del 50% de los accidentes producidos (HSE, 1999).

Es evidente que el elevado número de accidentes en la industria química causados por este factor, es razón suficiente para que se estudie y se tome en cuenta, especialmente debido a las consecuencias de los accidentes en este tipo de industria, los cuales generalmente conllevan un alto coste en términos de vidas, heridos y pérdidas materiales.

Gordon et al. (2001) establecieron que ciertamente el “factor humano” es el vínculo más débil dentro de un sistema pero que al mismo tiempo también es el más importante aunque este se encuentre afectado por diversos factores como la tecnología, el medio ambiente o por factores organizacionales.

El ser humano visto como un factor dentro de la industria cuenta con muchas ventajas con respecto a una máquina, un humano cuenta con un mejor patrón de discriminación y reconocimiento que cualquier máquina. Sin embargo, debido a nuestra baja capacidad de

memoria y habilidad de hacer cálculos numéricos de manera rápida y precisa, las máquinas se han vuelto de vital importancia en cualquier tipo de industria. Además de estas características que nos atañen, el desempeño del ser humano en la industria está también influenciado por las habilidades que hemos adquirido así como también por otros factores como la motivación y factores medioambientales.

Por lo tanto, el medio ambiente también afecta al desempeño del ser humano en la industria. Al decir medio ambiente, no sólo se refiere a las condiciones climáticas, sino también otros aspectos de las condiciones en las que se realiza el trabajo como el ruido o la temperatura. La inclusión de cualquiera de estos aspectos relacionados con el factor humano debe conducir a un efecto positivo para un análisis de riesgo.

Wiegmann et al. (2002) mencionan que incluir este enfoque humano y sus características a las tecnologías puede traer muchos beneficios, incluyendo un incremento en la eficacia y eficiencia de los procesos, una disminución de los errores e incidentes, de los costes de formación y también del personal accidentado. Incluso, en la actualidad existen programas europeos (INNHF,2011) por sus siglas en inglés *Innovation through Human Factors in risk analysis and management* dedicado a ofrecer una formación en el campo del análisis del riesgo para poder integrar el factor humano. Vista la relevancia de este factor, en la siguiente sección se va a definir a detalle.

3.2 Definición del concepto de factor humano

Existen diferentes definiciones y aproximaciones del “factor humano”. Trollip y Jensen (1999) establecieron que los factores humanos están relacionados con las personas en sus situaciones de vida y de trabajo; con su relación con las máquinas, con los procedimientos y con los ambientes que les rodean; y se refirieron también a sus relaciones con los demás.

La ergonomía es una disciplina que estudia los factores humanos y se dedica a estudiar las capacidades y limitaciones del ser humano para aplicar esta información al diseño del equipo, ambiente de trabajo, procedimientos y políticas para que sean más compatibles con

las habilidades humanas. De esta manera, se puede diseñar tecnología que trabaje para mejorar el desempeño humano. La Asociación Internacional de Ergonomía define a los factores humanos como una parte clave para comprender la interacción entre los seres humanos y los demás elementos de un sistema, como puede ser un sistema de prevención de accidentes. Además, señala que los factores humanos se deben tomar en cuenta en todas las tareas, trabajos, productos, entornos y sistemas en donde el humano esté presente, para tener una visión integral de la afectación que éste pueda llegar a tener en un análisis de accidentes.

La HSE (Health and Safety Executive, 2010) define a los factores humanos de la siguiente manera: “Los factores humanos se refieren a los factores organizacionales, de medio ambiente y de trabajo, así como a las características individuales y humanas que influyen en el comportamiento en el trabajo de una manera que puedan afectar la salud y la seguridad. Una manera simple de ver los factores humanos es pensar en tres aspectos: el factor de las condiciones en el trabajo, el factor individual y el factor organizacional, y su impacto en la salud y la seguridad de las personas.”

Algo común que se presenta al tratar con éste factor y tal como se ha podido interpretar en la sección anterior de este capítulo es que los términos “error humano” y “factor humano” se complementan. Esto puede conducir a confusiones, porque aunque la mayoría de los autores lo describen como iguales, muchas veces esto no es completamente cierto. Daniellou et al. (2013) establecieron que un error humano es a menudo el resultado de una situación en la que el trabajador no ha podido utilizar sus competencias por razones vinculadas con el diseño de los sistemas, la interfaz, la organización o la formación. Mientras que el factor humano muchas veces solamente lo definen como la relación entre el hombre, sus capacidades y la máquina.

Gordon et al. (1996) establecieron que los errores humanos y los factores humanos son términos muy parecidos, que muchas veces se estudian por separado, o de una manera conjunta. Ya que no existe aún un acuerdo en común de cómo tratarlos debido a que tienen la misma naturaleza. La mayoría de las empresas en sus informes de accidentes combinan estos dos términos. Estos autores trataron de establecer una relación entre estos dos

conceptos. En la figura 3.1 se presentan las causas de un accidente basadas en una clasificación de los factores humanos y las causas inmediatas de un accidente visto desde el concepto del error humano.

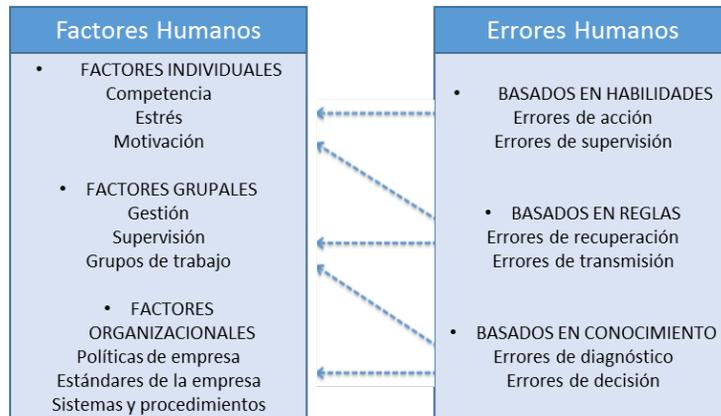


Figura 3.1. Relación entre las causas de un accidente (factores humanos) y sus causas inmediatas (errores humanos) (Adaptado de Gordon et al., 1996).

Independientemente de la forma que sea considerado este concepto, los factores humanos son muy importantes dentro de varias tipos de industria, alguna de las cuales se mencionan a continuación.

3.3 Importancia del factor humano en la industria

Los factores humanos son reconocidos como causa de accidentes en diferentes tipos de industria. En el ámbito marítimo y de instalaciones offshore se ha establecido que este factor es predominante como causa principal de los eventos no deseados. Diferentes estudios le adjudican a este factor desde un 75% hasta un 96% como causa principal:

- 79% en hundimientos de remolcadores (Cornier, 1994).
- 89 – 96% en colisiones entre embarcaciones (Bryant, 1991).
- 75% de incendios y explosiones (Bryant, 1991).

Löwe et al. (2005) realizaron un estudio de las mayores causas de los eventos no deseados en las industrias de proceso. Los resultados de su estudio fueron que los fallos humanos representan la mayor causa de este tipo de accidentes con un 64%, mientras que la segunda causa son las fallas técnicas con un 23% (Figura 3.2).



Figura 3.2. Causas principales de accidentes en las industrias de procesos
(Adaptado de Löwe, 2005).

Baybutt (2002) afirmó que entre un 50% y un 90% de los accidentes de procesos pueden ser atribuidos a fallos humanos. A pesar de la evidente contribución del factor humano en la industria de procesos, este parece ser un poco menospreciado. Kariuki (2007) estableció que los estudios en el ámbito del análisis de riesgo a lo largo de los años se han concentrado mucho más en el estudio de los equipos o en los aspectos técnicos de un proceso, aunque estos factores sean menos contribuyentes a eventos no deseados comparados con factores como los organizacionales o los referentes a las características del operador. En la figura 3.3 se observa esta afirmación.

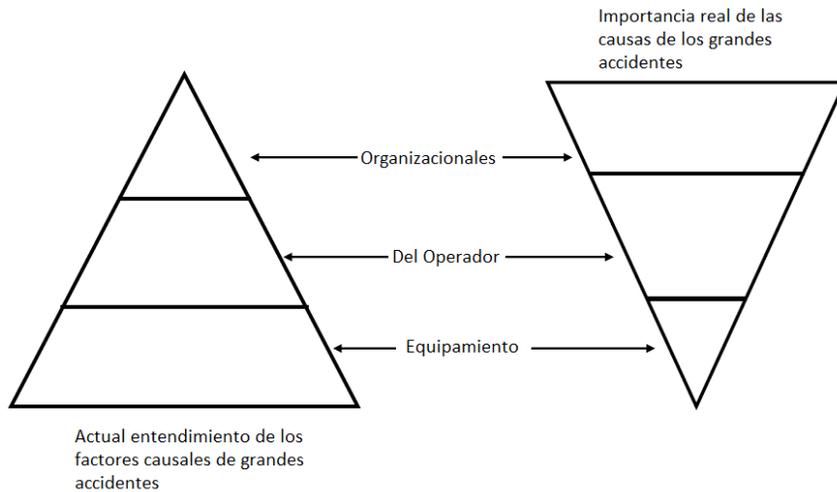


Figura 3.3. Factores contribuyentes a los grandes accidentes (Adaptado de Kariuki, 2007).

Baybutt (1996) estableció que aún no se le ha dado la suficiente importancia al factor humano como para reducir los fallos debidos al hombre en los accidentes. Este autor menciona que esta falta de importancia puede ser atribuida a lo siguiente:

- La falta de necesidad: Muchos ingenieros no son conscientes de los beneficios que se pueden llegar a tener cuando los factores humanos son tomados en cuenta.
- La falta de conciencia: Los ingenieros usualmente prestan mucha más atención a la fiabilidad en el equipamiento y no en el usuario final, que es el ser humano.
- Falta de comprensión de los factores humanos: Algunos ingenieros podrían pensar que al referirse a los factores humanos sólo se trata de un estudio psicológico por el cual van a ser juzgados y no como una herramienta para mejorar la seguridad de la planta.
- Miedo a incluir los factores humanos a los diseños de la planta: Los ingenieros generalmente ya tienen una gran carga de trabajo y pueden tener miedo que incluir estos factores les conlleve una saturación de sus capacidades.
- Miedo de las empresas a empezar a considerar los factores humanos: Al empezar a incluir este tipo de factores, harán que estén reflejados en directrices y recomendaciones por lo que serán obligatorios y lo ven como un coste adicional.

- Falta de integración: Aunque algunas aproximaciones ya se han hecho al factor humano, aun no se han incorporado completamente en la industria, parcialmente porque rediseñar una planta es difícil y caro. Por otro lado también porque no se ha hecho el esfuerzo de tener analistas del error humano, científicos del comportamiento humano y especialistas del factor humano trabajando juntos en una empresa.
- Falta de metodologías para resolver los problemas con el factor humano, sobre todo cuando se refieren a problemas organizacionales o socio-técnicos.
- Falta de analistas cualificados: Debido a la novedad de esta ciencia no existen suficientes expertos con un conocimiento adecuado en los campos de la ingeniería química, métodos de evaluación de riesgos, análisis de errores humanos o en ingeniería de los factores humanos.
- Falta de motivación: No fue hasta después de los años 90 cuando algunas regulaciones y directrices se vieron forzadas a empezar a tomar en cuenta este factor.

Como se ha mencionado, existen muchos accidentes donde la causa principal es el factor humano. A continuación, se mencionan los principales.

3.4 Accidentes atribuidos al factor humano

Bellamy et al. (2008) afirmaron que la causa de los siguientes accidentes, muchos de estos considerados como base del estudio del riesgo en la industria química, eran atribuibles a factores humanos incluyendo los problemas organizacionales de la empresa:

- Flixborough (UK, 1974): Explosión causada por una fuga a través de un bypass temporal operada por personal no suficientemente competente (Health and Safety Executive, 1975).
- Grangemouth (UK, 1987): Incendio provocado por una válvula de paso (mal diseño) e inadecuados procedimientos de aislamiento (Health and Safety Executive, 1989).
- Piper Alfa (UK, 1988). Explosión en una plataforma petrolífera provocado por un error de mantenimiento del personal.

- Allied Colloids (UK, 1992): Incendio provocado por la mala clasificación por parte del personal de los productos químicos almacenados (Health and Safety Executive, 1993).
- Hickson y Welch (UK, 1992): Dardo de fuego provocado por una reacción en cadena durante una limpieza no adecuada de un tanque (Health and Safety Executive, 1994).
- Octel (UK, 1994): Incendio provocado por la falta de atención del personal en una planta con un mantenimiento insuficiente (Health and Safety Executive, 1994).
- Texaco (UK, 1994): Explosión e incendios debido al incorrecto uso de instrumentos de control, sistemas de alarmas y mala gestión en la organización (Health and Safety Executive, 1997).

Otro más reciente como:

- Ciudad de Texas (2005). Una explosión provocó la muerte de 15 trabajadores y 170 heridos, las causas de le atribuyen a la falta de formación del personal, sobrecarga de trabajo y falta de supervisión (Daniellou, 2013).

Como ya se ha establecido anteriormente, la mayoría de los grandes accidentes que han ocurrido a lo largo de los años culpan a los errores humanos como su causa principal, corroborado que el ser humano es el mayor contribuidor de los eventos indeseados. Turner (1978) describió al humano como el elemento más débil en cualquier sistema ingenieril. Esto se debe al hecho que todos los sistemas ingenieriles dependen de la intervención humana en algún momento.

A continuación, se detallan dos de los accidentes más desastrosos dentro de la industria y se especifica el rol del factor humano en dichos accidentes.

3.4.1 Piper Alpha

Piper Alpha se mantiene como una de las más grandes tragedias de los tiempos modernos. Este desastre ocurrió el 6 de julio de 1988 y supuso la pérdida de 167 vidas humanas. Era la plataforma petrolífera más grande del mundo en ese entonces (producía 317 mil barriles de petróleo al día) (Figura 3.4). El día del accidente, como parte de mantenimiento general, los técnicos quitaron y comprobaron las válvulas de seguridad que eran esenciales en la

prevención de la acumulación peligrosa del gas líquido se comprobaron más de 100 válvulas de seguridad. Sin embargo, los técnicos cometieron un error y olvidaron sustituir una de ellas.



Figura 3.4. Plataforma petrolífera Piper Alpha antes y después del siniestro (AICHE, 2005).

Sin entrar en detalle en un análisis profundo de este desastre, las causas se pueden atribuir a un error humano. Kariuki (2007) señaló que se podían destacar los siguientes factores humanos que causaron el desastre:

- **Comunicación:** Existió un problema de comunicación e información, ya que el cambio de turno no fue hecho sistemáticamente y hubo un fallo en la comunicación cuando las autorizaciones de trabajo de las válvulas fueron generadas.
- **Supervisión:** La brida que se instaló en lugar de la válvula de presión no era hermética, por lo tanto, no podría soportar altas presiones. No hubo ninguna inspección tras el montaje de esta brida.
- **Formación:** Los operadores no fueron entrenados para este tipo de situaciones.

Este desastre es un perfecto ejemplo de cómo los factores humanos y organizacionales pueden llegar a causar un accidente grave.

3.4.2 Accidente Texaco

El 24 de julio de 1994 una explosión, seguido por varios incendios ocurrió en la refinería de Texaco (Pembroke, Wales). Veinte toneladas de hidrocarburos fueron liberadas y explotaron cuando entraron en contacto con la antorcha. Hubo 26 heridos y el coste estimado del accidente fue de 48 millones de libras británicas.

La serie de eventos comenzó durante la mañana del día del incidente, una severa tormenta eléctrica afectó la columna de destilación a vacío, la unidad de alquilación y la unidad de fluidización de craqueo catalítico (FCCU). La figura 3.5 representa un esquema simplificado de la planta Texaco. La unidad de destilación de crudo no se encontraba en funcionamiento debido a un incendio, al igual que todas las demás unidades a excepción de la FCCU.

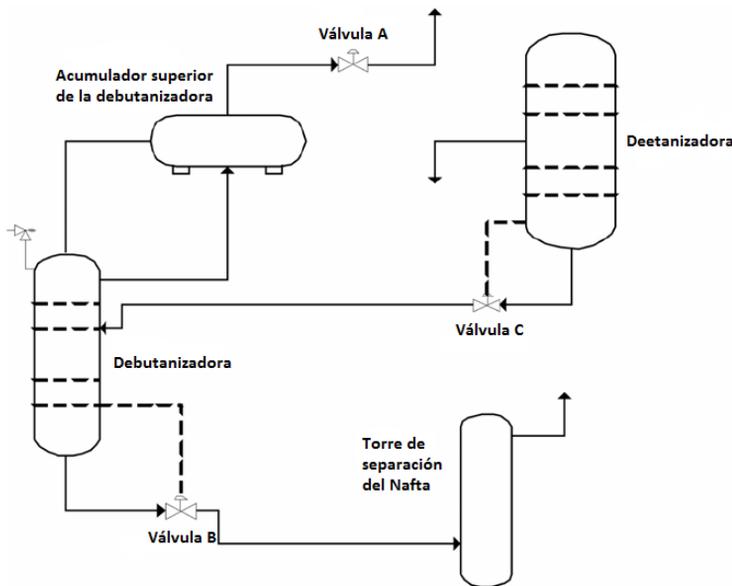


Figura 3.5. Esquema simplificado de la planta Texaco (Adaptado de Dykes, 1997)

El incidente comenzó cuando el flujo de hidrocarburo se condujo hacia la deetanizadora. Para prevenir una pérdida total de líquido desde la deetanizadora, la válvula A fue cerrada de acuerdo con el diseño de la planta, lo que causó un bajo nivel en la debutanizadora y

provocó el cierre automático de la válvula B, que generó que el flujo de hidrocarburo hacia la debutanizadora se bloqueara.

El hidrocarburo en la debutanizadora aún estaba sometido a calentamiento. La temperatura y la presión aumentaron por lo que la válvula de alivio de presión y la debutanizadora fueron a venteo. La válvula A fue abierta y el flujo hacia la debutanizadora fue reestablecido. Esto debió causar que la válvula B se abriera y permitiera que el flujo de hidrocarburo entrara hacia la unidad de separación de nafta. Sin embargo, la válvula B permaneció cerrada, aunque en el monitor de operaciones del operador se mostraba que estaba abierta, por lo que el operador no supo que no había flujo hacia la torre de separación.

Cuando el operador notó que la presión en la debutanizadora seguía aumentando, abrió la válvula C para proveer otra ruta de escape. Esto provocó un alto nivel en el tambor separador de la antorcha, mientras los operadores estaban concentrados en los problemas de la debutanizadora y la debutanizadora. La combinación del alto nivel en la antorcha y el venteo de la debutanizadora permitió que el material entrara en contacto con la antorcha y causara la explosión.

Kariuki (2007) señaló que de este accidente se podían identificar los siguientes factores humanos:

- **Formación y habilidades:** Los operadores no estaban capacitados para controlar el cambio de masa simple y volumétrica cuando se experimentaron problemas en el flujo o nivel. No existió ninguna orientación sobre cómo manejar situaciones de emergencia ni como iniciar el paro de la planta, ya que las operaciones continuaron cuando deberían de haber sido paradas.
- **Configuración de alarmas:** Se descubrió que el 87% de las 2040 alarmas, estaban clasificadas como de alta prioridad cuando sólo deberían ser informativas. Por lo que, cuando ocurrió el suceso, el operador no pudo manejar todas las alarmas activadas e identificar el verdadero problema.

Debido a graves incidentes como éste, el factor humano fue incluyéndose poco a poco en las directrices y legislaciones internacionales con el fin de prevenir accidentes.

3.5 Marco legal

Debido a la importancia del factor humano dentro de la industria química y a las consecuencias fatales de los accidentes que estos han provocado, los factores humanos han ido aumentando su presencia en varias regulaciones a lo largo de la historia del análisis de riesgo en la industria química. A continuación, se describe como se han ido enfocando los factores humanos en diversas directrices y regulaciones vigentes en la Unión Europea.

3.5.1 Directivas SEVESO

Como ya se comentó en el capítulo 2 esta directiva fue destinada a la prevención y respuestas de emergencia en caso de un accidente grave. Esto se debe como consecuencia de las catástrofes ocurridas en los años 70 como Flixborough (UK, 1974) y Seveso (Italia, 1976). Con el interés de mejorar la seguridad en las plantas de proceso químico, se creó la directiva SEVESO I (Directiva 82/5018EEC) para reducir estas situaciones.

La directiva se enfocó en medidas técnicas con el objetivo de reducir la probabilidad y el impacto de las consecuencias de los accidentes que afectan a las personas, propiedades y el ambiente fuera de los límites del sitio operativo

Después de otros accidentes fatales dentro de la industria química en años posteriores como Bhopal (India,1984) o Basel (Suiza, 1986), incluso después de que la directiva SEVESO hubiera sido implementada, se tuvo que hacer una revisión de ésta y se llegó a la conclusión de que no sólo es necesario tomar en cuenta los detalles técnicos de los procesos si no también que se necesita de sistemas efectivos de organización, ya que una gestión deficiente de la empresa también puede ser causa de accidentes en la industria química (ILO, 2001).

Basado en esta teoría se creó la directiva SEVESO II (Directiva 96/82/EC), la cual fue adoptada en 1996 y en donde, entre otros puntos importantes, se destaca que la empresa debe de contar con un sistema de gestión de la seguridad operacional (SGSO).

Dentro de esta directiva se dan reconocimiento a ciertos factores como los organizacionales y de gestión (SEVESO II, 1996): “Considerando que dentro del análisis de los accidentes graves declarados se indica que en su mayoría estos accidentes han sido resultado de deficiencias de gestión y/o organización, se necesita establecer a escala comunitaria los principios básicos para los sistemas de gestión, que deben de ser adecuados para la prevención y control de riesgos de accidentes graves para poder limitar sus consecuencias”.

Por lo tanto, esta directiva fue la primera regulación que le dio importancia al factor humano dentro de la seguridad de los procesos químicos a través de factores organizacionales y de gestión, reconociendo que la interacción entre los humanos y los sistemas o procesos químicos son de vital importancia en la empresa química.

De forma específica, el artículo 9 sección 1(a) de esta directiva establece que el trabajador tiene que hacer un informe de seguridad con el propósito de demostrar que la empresa cuenta con una política de prevención de accidentes graves y debe contar con un sistema de gestión de seguridad de la gestión operacional (SGSO) de acuerdo con la información del anexo LII, tal como se presenta a continuación:

Anexo LII: (c) Los siguientes temas serán tratados por el sistema de gestión de seguridad de la empresa: Organización y personal – Las funciones y responsabilidades del personal asociado a la gestión de los riesgos de accidentes graves en todos los niveles de organización. La identificación de las necesidades de formación de dicho personal y la provisión de dicha información y, en su caso, de los subcontratistas;

De este anexo y de las características de un SGSO (figura 3.6) se pueden extraer aspectos relacionados con el factor humano como la formación del personal, la comunicación, el lugar de trabajo, etc.

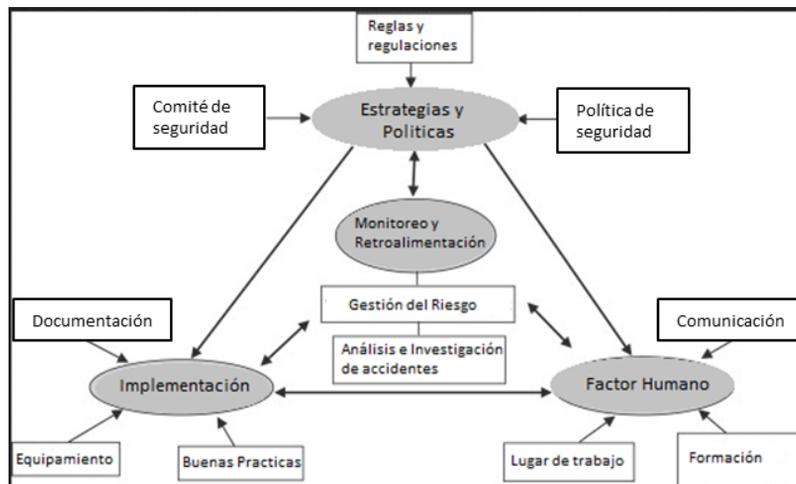


Figura 3.6. Aspectos fundamentales de un sistema de gestión de seguridad (Adaptado de Liou et al., 2008).

Recientemente ha sido creada la nueva directiva SEVESO III (Directive 2012/18/EU), pero sin cambios con respecto a los factores humanos. Existen varias leyes de salud y seguridad dentro de la Unión Europea que promueven la seguridad de los trabajadores. Estas leyes no son directamente dirigidas a algún tipo de industria en concreto. Están diseñadas para prevenir y controlar accidentes menores. Estas leyes, explicadas a continuación están más centradas en las afectaciones de factores externos que puedan dañar la seguridad y salud del trabajador. Estos factores externos son considerados también como factores humanos.

3.5.2 Directiva 89/654/EEC

Esta directiva establece los requerimientos mínimos de salud y seguridad que el lugar de trabajo debe de tener. Esto se refiere al entorno de trabajo en donde las tareas son desarrolladas y su finalidad es asegurar un nivel de protección alto para el trabajador.

3.5.3 Directiva 2003/10/EEC

Esta directiva tiene la finalidad de cubrir los requerimientos mínimos de salud y seguridad que los trabajadores puedan estar expuestos por el ruido.

3.5.4 Otras legislaciones

Existen otros tipos de legislaciones internacionales destinadas a proteger al trabajador asegurándose que cuenten con sistemas de gestión de la seguridad operacional (SGSO) efectivos. Una de éstas es la proporcionada por la Oficina Internacional del Trabajo (OIT) en el documento “Directrices relativas a los sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo” (ILO-OSH, 2011). Otras muy importantes son las creadas por la British Standard Institution (BSI) en los documentos “Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional” OHSAS 18001 y OHSAS 18002).

El factor humano es reconocido actualmente en las directrices, normativas y legislaciones más recientes, por lo que es de suma importancia de qué manera ha ido influyendo este factor en el análisis de riesgo.

3.6 Evolución del factor humano en la prevención de accidentes

Son varios autores los que han explicado mediante la creación de algunos modelos el papel que tiene el factor humano, especialmente en el análisis de riesgo. Bellamy et al. (2008) crearon un triángulo de seguridad (*Warning Triangle Circle*) en donde aseguran que para un control de riesgo se deben de tomar en cuenta los sistemas de gestión de la seguridad (SGSO), los factores humanos y la organización de la empresa (Figura 3.7).

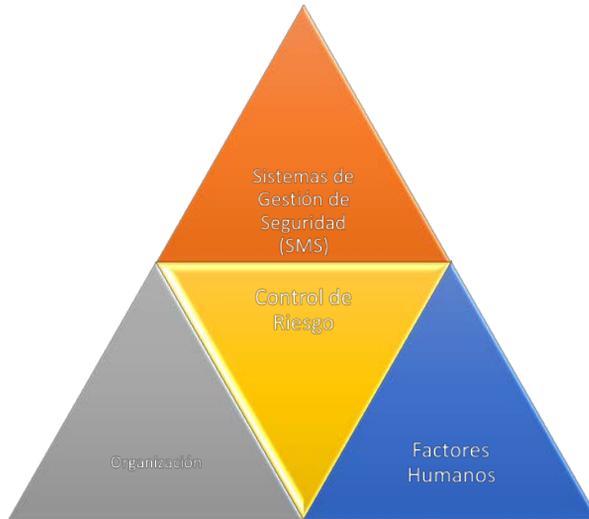


Figura 3.7. Triángulo de seguridad (Adaptado de Bellamy et al. 2008).

De acuerdo con Itoh (2004), el desempeño humano involucra una interacción compleja entre diferentes componentes del sistema y del trabajador. Edwards (1988) propuso el modelo SHEL que se puede ver en la figura 3.8, en donde describió los componentes necesarios para una integración humano-máquina.

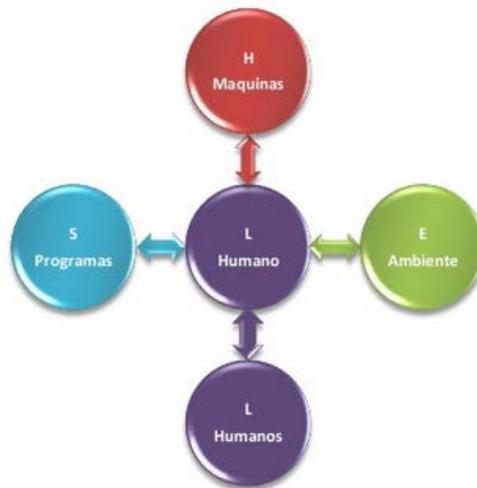


Figura 3.8. Factores del Modelo SHEL (Adaptado de Edwards, 1988).

SHEL es un acrónimo en inglés para *Software, Hardware, Environment* y *Liveware*.

(S) *Software*: Procedimientos, formación, simbología, etc.

(H) *Hardware*: Máquinas y equipos.

(E) *Environment*: El medio ambiente y las circunstancias operativas del lugar del trabajo.

(L) *Liveware*: El hombre en el puesto de trabajo.

Este modelo, aporta las relaciones del hombre con otros hombres (humano – humano), con las máquinas, con los programas o con el medio ambiente. No contempla otro tipo de relaciones, (máquina-máquina, máquina-medio ambiente, etc.) y ha sido creado como medio para entender el factor humano en los sistemas complejos.

Este modelo fue luego modificado por Kawano (2002), incluyendo el factor de administración (management), “m” en la figura 3.9, llamado m-SHEL, afirmando que para reducir los accidentes se tenía que poner atención no sólo en el operador si no en todo el sistema humano-máquina-ambiente de trabajo.

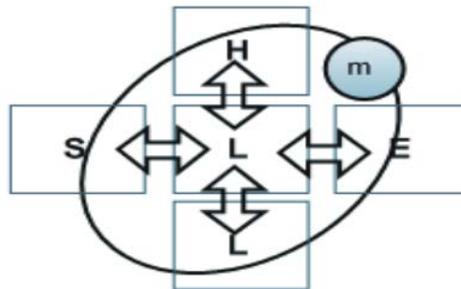


Figura 3.9. Modelo m-SHEL de Kawano (2002).

Löwe y Kariuki (2004) establecieron que un evento no deseado es el resultado de condiciones latentes que se refiere a los derivados de la organización y de errores activos que son los referentes a los errores del operador. Las condiciones latentes no afectan inmediatamente el funcionamiento del sistema, pero en combinación con otros factores como el error del operador puede causar el evento no deseado. Las condiciones latentes son el resultado de malos o no adecuados diseños y de decisiones organizacionales (Figura 3.10).



Figura 3.10. Factores causantes de un evento no deseado (Adaptado de Löwe y Kariuki, 2004).

Posteriormente, el concepto fue ampliado por los autores, incluyendo más factores humanos como se muestra en la figura 3.11, en donde se puede apreciar que un evento no deseado puede ser causado por un error humano o por un fallo del equipo causado. Algunos ejemplos serían: por la corrosión, por un diseño inadecuado del espacio de trabajo, factores personales del trabajador como la atención o la motivación entre otros. Este evento no deseado puede ocurrir por una de estas causas identificadas o por la combinación de varias.

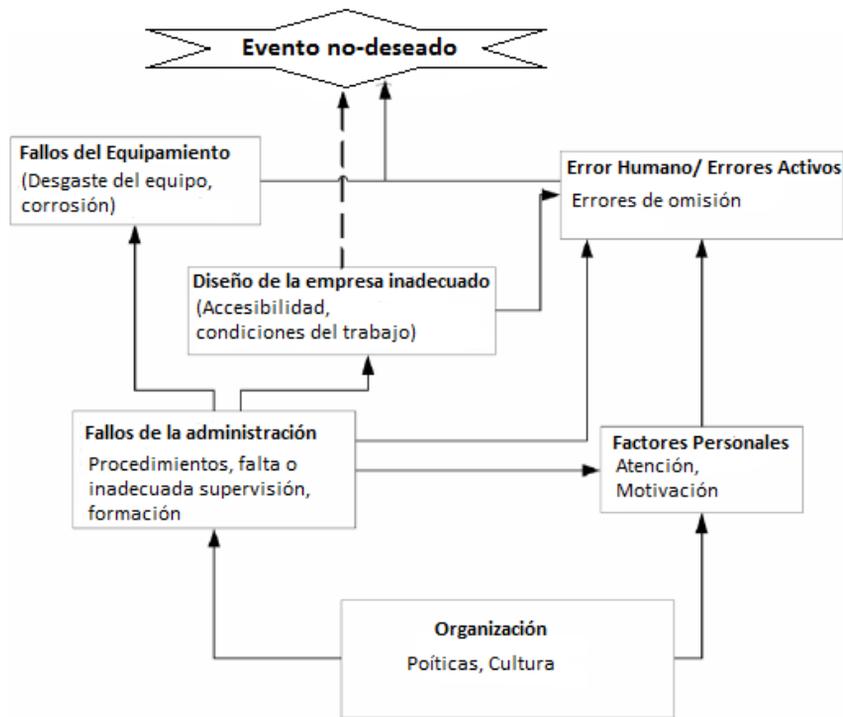


Figura 3.11 Factores humanos causantes de un evento no deseado (Adaptado de Löwe y Kariuki, 2006).

Otro modelo que tiene en cuenta el factor humano para la prevención de accidentes es el de Reasons (1990), el cual creó un modelo usualmente referido como “el modelo del queso suizo” (Figura 3.12) que explica como muchos tipos de factores pueden contribuir y converger para causar un accidente. En su trabajo subrayó el hecho de que tanto los factores humanos como los errores humanos relacionan todo el sistema de seguridad para la prevención de accidentes y no es algo solamente propio del trabajador.

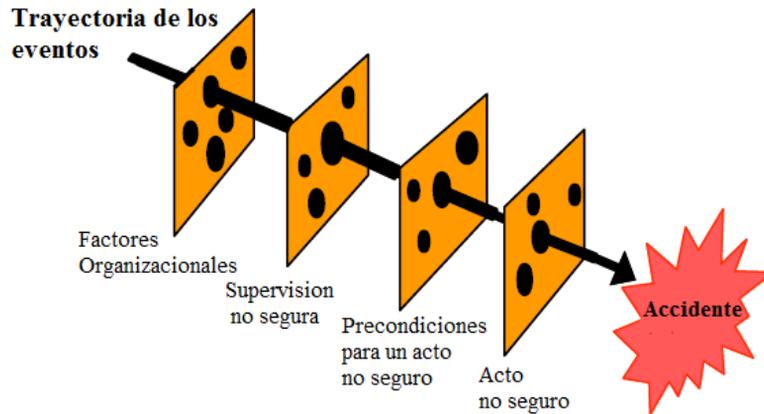


Figura 3.12- Modelo del queso suizo (Adaptado de Reasons, 1990).

Miller et al (2000) complementaron este modelo agregando barreras de protección o también las llamaba intervenciones de seguridad, e introdujeron un “triángulo de efectividad” (Figura 3.13), en donde se presentan 8 niveles de barreras que pueden ser usadas para prevenir accidentes. Comenzando por la base del triángulo, sus ocho elementos son:

- Normativa y cultura- Gestión de las políticas de la industria que promuevan la seguridad y un ambiente de trabajo centrado en el humano.
- Diseño del espacio del trabajo – Diseñado ergonómicamente.
- Control del ambiente de trabajo – Manteniendo la luz, temperatura y ruido con los rangos óptimos para el trabajo.
- Selección del personal – Escoger las personas correctas para el trabajo.
- Formación y procedimientos estándares de operación – asegurarse que los trabajadores tengan el conocimiento y habilidades necesarias para el trabajo.
- Relaciones interpersonales (Comunicación) – El intercambio de información necesaria entre los trabajadores.
- Ayudas al trabajo – Entendibles, fáciles de seguir.
- Aptitudes - Asegurarse que los trabajadores estén alerta, concentrados y capaces de un rendimiento seguro.

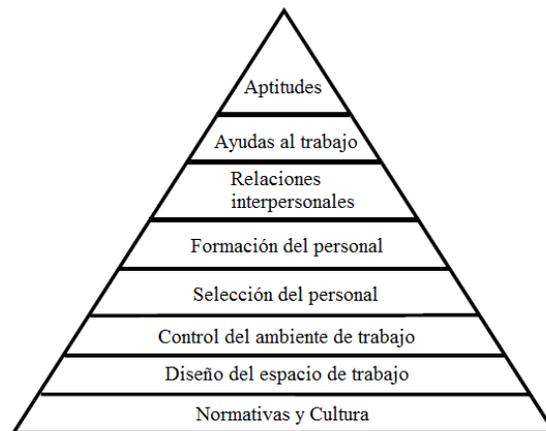


Figura 3.13. Triángulo de efectividad de Miller et al. (2000).

Como ha mencionado, son muchos los tipos de factores humanos que se relacionan con análisis de riesgo, que tiene como finalidad la prevención de los accidentes. Por esta razón, es también muy importante conocer las variables que conforman el factor humano, que se presentan en la siguiente sección.

3.7 Variables del factor humano

El factor humano incluye muchas clasificaciones de sus variables entre las que destacan:

- La compañía de investigación de accidentes marítimos (MAIB) tiene una taxonomía de los factores humanos relativamente simple, clasificándolos principalmente en función del error del trabajador y de los factores organizacionales. En 1999, MAIB desarrolló una clasificación de los factores humanos divididos en seis niveles:
 - ❖ Organismos de enlace externo (e.g. regulaciones)
 - ❖ Organización
 - ❖ Equipamiento
 - ❖ Ambiente de trabajo
 - ❖ Individuales
 - ❖ Factores del personal

En dicha clasificación se menciona que estos niveles pueden estar relacionados, por ejemplo, con las normativas de la organización sobre la formación de los trabajadores y,

también, pueden influenciar en las habilidades y los conocimientos a un nivel individual. También se acepta que habrá factores humanos que contribuyen a algún accidente que no se encuentra en alguna de estas categorías.

- Un estudio de la guardia costera de los estados unidos (U.S. Coast Guard, 1995) hizo una clasificación de los 10 factores humanos en los cuales se debe trabajar para así evitar los accidentes:
 - ❖ Fatiga
 - ❖ Comunicación inadecuada
 - ❖ Conocimiento general técnico inadecuado
 - ❖ Conocimiento de los sistemas inadecuado
 - ❖ Pobre diseño de automatización
 - ❖ Decisiones basadas en información inadecuada
 - ❖ Falta de criterio
 - ❖ Normas, políticas o practicas deficientes
 - ❖ Mantenimiento pobre
 - ❖ Condiciones medioambientales peligrosas

- La oficina de seguridad marítima y protección del medio ambiente (US Office of Marine Safety, Security and Environmental Protection, 1995) desarrolló una estrategia para prevenir incidentes resultantes del factor humano, dividiendo este factor en 5 grupos:
 - ❖ Gestión
 - ❖ Estatus del trabajador
 - ❖ Condiciones del ambiente del trabajo
 - ❖ Conocimiento
 - ❖ Toma de decisiones

- Otra clasificación de la compañía nuclear británica, siguiendo el sistema de clasificación internacional de seguridad (ISRS por sus siglas en inglés *International Safety Rating System*, 1989), cubre las siguientes áreas:
 - ❖ Factores personales: capacidad inadecuada, falta de conocimiento, falta de habilidades, estrés, falta de motivación.

- ❖ Factores del trabajo: supervisión y liderazgo inadecuado, ingeniería inadecuada, mantenimiento inadecuado, compras inadecuadas, equipos y herramientas inadecuadas, estándares de trabajo inadecuados.
- La fuerza aérea británica cuenta con un programa sobre los factores humanos llamado “BASIS” (por sus siglas en inglés *British Airways Safety Information System*), el cual divide dichos factores humanos en 5 categorías:
 - ❖ Factores de las acciones del personal.
 - ❖ Factores personales.
 - ❖ Factores organizacionales.
 - ❖ Factores informacionales.
 - ❖ Factores medioambientales.
- La HSE (Health and Safety Executive, 2010) detalla a los factores humanos de acuerdo con su definición mencionada en la sección 3.2 de éste capítulo y representada en la figura 3.14, basada en tres pilares: Factor Individual, Factor del trabajo y Factor Organizacional.



Figura 3.14. Diagrama de los factores humanos (Adaptado de HSE, 2010).

Cada categoría se especifica de la siguiente manera:

- ❖ De trabajo: Incluyen áreas como la naturaleza del trabajo, la carga de trabajo, el entorno laboral y los procedimientos. Las tareas de los trabajadores deben de estar diseñadas de acuerdo con principios ergonómicos que tomen en cuenta las capacidades y limitaciones físicas y mentales de las personas.
- ❖ Individual: incluyen las habilidades, personalidad, actitud y percepción del riesgo de las personas. Las características individuales influyen en el comportamiento de una manera compleja, por lo tanto, afectan a todo el sistema, algunas características del individuo como la personalidad son fijas y muy difícilmente podrán ser cambiadas, mientras que otras como las habilidades y actitudes pueden ser cambiadas o mejoradas.
- ❖ Organizacional: incluyen los recursos, comunicaciones y liderazgo. Las políticas y normativa de la empresa considerando los procedimientos de contratación del personal. Muchos de estas características son pasadas por alto en el momento de analizar un trabajo, sin embargo tienen una influencia significativa en el comportamiento individual y grupal dentro de una industria.

Como se puede ver en este capítulo, el factor humano se puede definir y clasificar de múltiples maneras. De todos modos, está claro que el factor humano es un aspecto que se debe de tomar en cuenta para la prevención de accidentes. Tal como se comentó en el capítulo 2, éste genera incertidumbre dentro del análisis de riesgo y una de las metodologías preferidas para tratar la incertidumbre es la lógica difusa. Esta metodología es explicada en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV. LÓGICA DIFUSA

En este capítulo se explica uno de los métodos más empleados para tratar la incertidumbre: la lógica difusa, que más tarde se aplicó para desarrollar una de las metodologías de esta tesis. Primeramente, se introduce este concepto y se compara con la lógica clásica. Después, se explica el proceso de fusificación en donde se introducen términos necesarios para llevar a cabo este proceso como: conjuntos difusos, variables lingüísticas y funciones de pertenencia. El proceso de inferencia difusa es el siguiente paso de esta metodología, por lo que se explica cada uno de sus pasos: establecimiento de los pesos, reglas difusas, proceso de implicación y agregación. Finalmente, se presenta la última etapa de ésta metodología: la defusificación.

4.1 Introducción

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, entender y cuantificar el factor humano y la incertidumbre que éste genera no es tarea sencilla debido a su naturaleza y a la cantidad tan amplia de variables que pueden relacionarse cuando se habla de dicho factor. Por lo tanto, es normal que la industria química lo deje, en algunas ocasiones a un lado. Una metodología que se puede utilizar para tratar este tipo de incertidumbre causada por el factor humano es la lógica difusa.

La lógica difusa no es ajena a los temas relacionados con el riesgo, es una metodología que permite incluir parámetros cualitativos a un sistema, como es el factor humano, ya que se basa en la cuantificación de la incertidumbre causada por la ambigüedad de los datos o su imprecisión (Gentile et al., 2001). Este método es una alternativa a la lógica clásica y se basa en la razón humana (Zadeh, 1965). La mayor contribución de esta teoría es su habilidad de representar datos que son ambiguos o vagos mediante “razonamientos humanos” de una manera precisa. Rousseeuw (1995) dijo que estos razonamientos humanos pueden ser de mucha ayuda para resolver problemas ingenieriles a través de la introducción de los conocimientos de los expertos en el sistema.

Varios autores han utilizado la lógica difusa para temas relacionados con el análisis de riesgo. Darbra et al. (2008) usaron esta teoría para definir el comportamiento de variables en la evaluación del riesgo medioambiental de las emisiones de sustancias ecotóxicas en plantas químicas. Güranlı et al. (2009) también usaron la lógica difusa para establecer el riesgo implicado para los empleados que trabajan en la construcción.

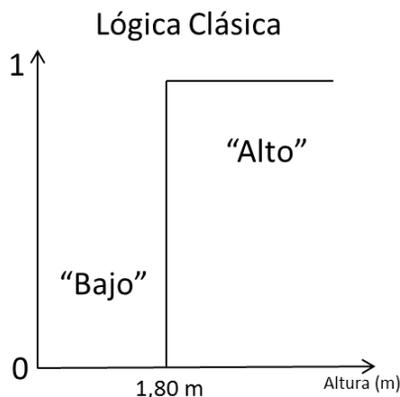
Zhou (2009) utilizó ésta metodología para monitorear y mejorar el control de las instalaciones de almacenamiento de gas inflamable, mientras que Markoski et al. (2011) usaron una aplicación basada en esta teoría para realizar un análisis de riesgo de una explosión. Shahriar et al. (2011) hicieron un análisis de riesgo de tuberías de gas y petróleo usando lógica difusa. Como ya se ha mencionado, esta metodología se contrapone a la lógica clásica, a continuación se explica porqué.

4.2 Lógica difusa vs Lógica clásica

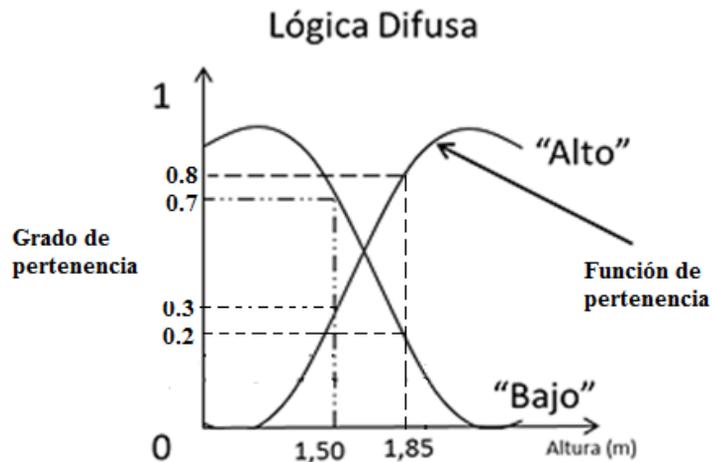
Mientras en la lógica clásica toda proposición debe ser o “cierta” o “falsa”, para la lógica difusa una afirmación puede ser simultáneamente “cierta” o “falsa” con cierto grado de pertenencia. Esta teoría usa variables lingüísticas para su funcionamiento, definidas a través de conjuntos difusos con un grado de pertenencia. Para aclarar este concepto seguidamente se pone un ejemplo: la clasificación de altura de una persona con lógica clásica y lógica difusa.

Tal como se ve en la figura 4.1 (a), de acuerdo con la lógica clásica si una persona mide menos de 1,80 metros se considera “Baja”. En cambio, si mide 1,80 o más será “Alta”. Para la lógica clásica el conjunto de “personas altas” es un conjunto exclusivamente para las personas que midan 1,80 o más. Todas las demás personas que midan por debajo de este valor pertenecerán únicamente al grupo de “personas bajas”. Entonces una persona que mida 1,81 metros será considerada “alta” y una persona que mida 1,79 metros “baja”, aunque sean sólo 2 centímetros de diferencia.

Para la lógica difusa el conjunto difuso de “personas altas” es representado por una función de pertenencia que define la transición de “persona alta” a “persona baja”. De esta manera se le puede asignar un grado de pertenencia que va de entre “0” a “1” a cada persona a medir.



(a)



(b)

Figura 4.1. Ejemplo de la Lógica Difusa comparada con la Lógica Clásica.

Por lo tanto, como se muestra en la parte (b) de la figura 4.1, una persona de 1,85 metros que en la lógica clásica sólo correspondería al grupo de “personas altas”, en la lógica difusa pertenecería en un 20% al grupo de “Bajos” (0,2) y un 80% al conjunto de “Altos” (0,8). De la misma manera, una persona que mida 1,50 metros tendría un grado de pertenencia de 0,3 al grupo “Altos” y un 0,7 al grupo de “Bajos”.

4.3 Desarrollo del método difuso

A continuación, se explican los diferentes pasos de esta metodología utilizando como base la lógica difusa. Estos pasos se pueden ver esquematizados en la figura 4.2.

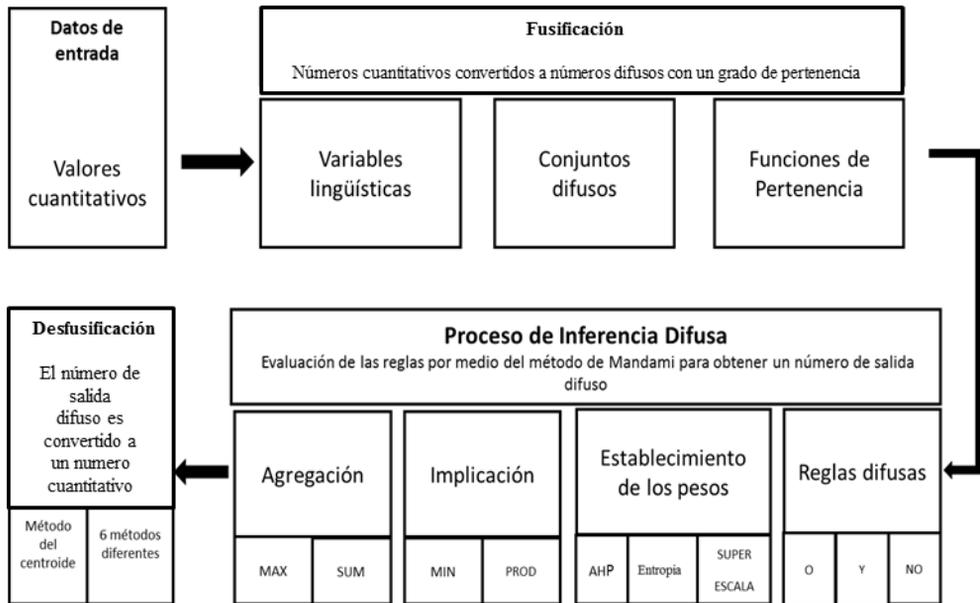


Figura 4.2. Metodología de la lógica difusa.

En primer lugar, se deben identificar las variables de entrada y salida del sistema que generalmente son valores cuantitativos. Luego se entra en el proceso de “fusificación” que se explica a continuación, seguido por el resto de los pasos.

4.3.1 Fusificación

Es el proceso en el que los datos de entrada van a ser fusificados y convertidos a números difusos con cierto grado de pertenencia. Esto se realiza por medio de la identificación de variables lingüísticas asociadas a cada variable, conjuntos difusos y funciones de pertenencia.

4.3.1.1 Identificación de las variables lingüísticas y conjuntos difusos

Para cada una de las variables identificadas en el primer paso, se deben de establecer las variables lingüísticas y conjuntos difusos. Las variables lingüísticas aportan información útil para el razonamiento humano, por ejemplo: condiciones pobres, aceptables, excelentes. Este tipo de términos proporcionan una transición gradual de estados y debido a su naturaleza

lingüística, tienen la capacidad de expresar y trabajar con observaciones y medidas de incertidumbre.

Los conjuntos difusos son lo contrario a los conjuntos clásicos basados en la lógica Booleana, donde un conjunto es representado por una colección de elementos A:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad [4.1]$$

Estos conjuntos también pueden ser representados de la siguiente manera:

$$A = \{x | P(x)\} \quad [4.2]$$

X toma el valor de $\mu_A(x) = 1$ cuando P(x) es verdadero y un valor de $\mu_A(x) = 0$ cuando la proposición P(x) no es satisfecha. Por lo tanto, la función característica localiza los elementos x del conjunto universal X a dos elementos {0, 1}:

$$\mu_A: X \rightarrow \{0, 1\} \text{ donde } x \in X \quad [4.3]$$

En cambio, un conjunto difuso en el universo representado por “U” puede ser definido como se presenta en la siguiente ecuación:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), | x \in U\} \quad [4.4]$$

Donde $\mu_A(x)$ es la función de pertenencia, “U” es el universo y “x” es un conjunto finito de puntos contenidos en el universo. De esta manera los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos, ya que estos a diferencia de los conjuntos clásicos contemplan la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto. El establecimiento de estos conjuntos difusos tiene una gran importancia en el proceso de la lógica difusa.

4.3.1.2 Funciones de pertenencia

Como último paso del proceso de fusificación se deben de establecer las funciones de pertenencia del sistema (Figura 4.2), estas funciones asignan a los valores de entrada un valor en el rango 0 a 1, en donde 0 es igual al 0% de pertenencia y 1 es igual al 100% de pertenencia. Este tipo de funciones transforman el valor numérico de una variable en un grado de pertenencia a un conjunto difuso.

Wang (1997) afirmó que las funciones de pertenencia más convenientes y simples son formadas por líneas rectas, como la triangular y la trapezoidal, sin embargo hay casos en donde las líneas curvas como la gaussiana y sigmoideal pueden mejorar los resultados del sistema. En la figura 4.3 se observan las funciones de pertenencia más comúnmente usadas.

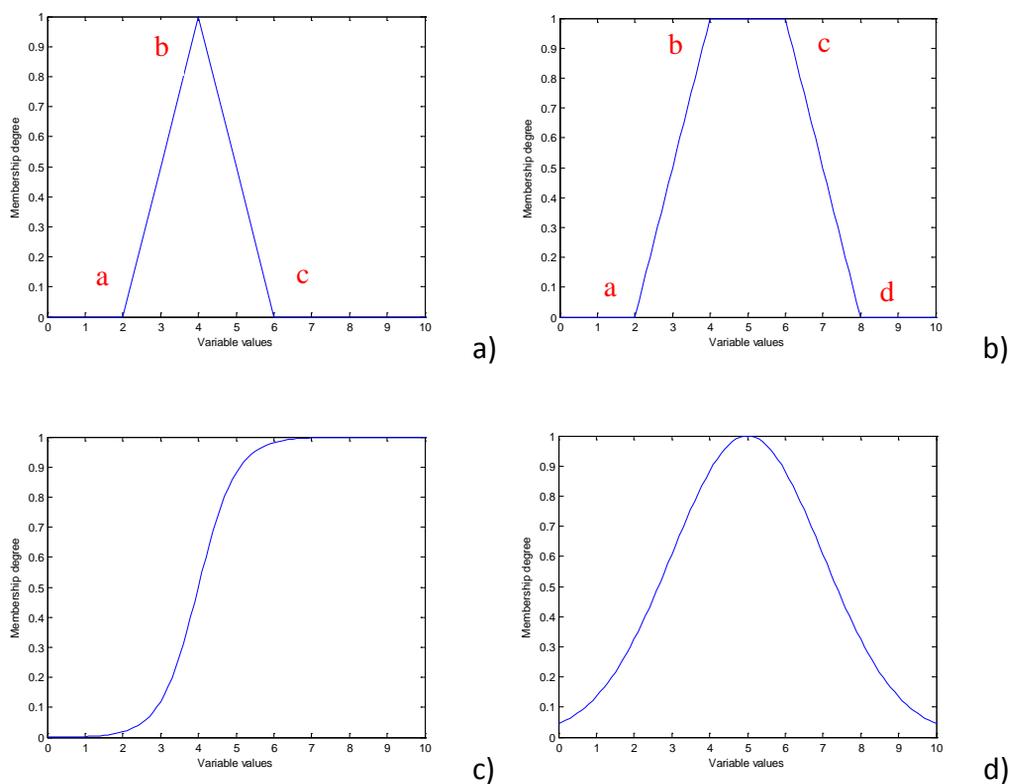


Figura 4.3. Funciones de pertenencia más comúnmente usadas: (a) Triangular, (b) Trapezoidal, (c) Sigmoidal y (d) Gaussiana (Betrò, 2011).

Para cada tipo de función de pertenencia, se tiene que definir varios parámetros como se especifica a continuación:

- Curvas triangulares (a): dependen de tres parámetros a, b y c y están definidas por la siguiente ecuación:

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{for } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{for } x > c \end{cases} \quad [4.5]$$

- Curvas trapezoidales (b): éstas están caracterizadas por cuatro parámetros (a, b, c y d) y definidas por la siguiente ecuación:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a \leq x < b \\ 1 & \text{for } b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{for } c \leq x < d \\ 0 & \text{for } x \geq d \end{cases} \quad [4.6]$$

- Curvas de forma-S (c): están caracterizadas por dos parámetros a y b y representadas por la siguiente ecuación:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2 & \text{for } a \leq x < \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2 & \text{for } \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 1 & \text{for } x \geq b \end{cases} \quad [4.7]$$

- Curvas gaussianas (d): también dependen de dos parámetros σ y c y están representadas por la siguiente ecuación:

$$f(x; \sigma; c) = \exp \left[\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2} \right] \quad [4.8]$$

Escoger diferentes funciones de pertenencia puede beneficiar al sistema, sin embargo también significa más complejidad matemática y computacional. De acuerdo con la figura 4.2, aquí acabaría el proceso de fusificación. El siguiente paso de la metodología es el proceso de inferencia difusa.

4.3.2 Proceso de Inferencia difusa

Yen y Langari (1999) establecieron que los valores a convertir pueden ser variables lingüísticas descritas por reglas difusas (Modelo de Mamdani) o por funciones lineales (Modelo de Sugeno). El método más utilizado comúnmente es el modelo Mamdani, por lo tanto, éste es el que se explicará en esta sección.

Después de la fusificación, los valores cuantitativos van a ser evaluadas mediante reglas difusas para obtener un valor difuso. Por lo tanto, los valores de entrada del modelo de lógica difusa ahora son variables lingüísticas explicadas por conjuntos difusos. La base de este proceso son las reglas difusas las cuales se explican a continuación:

4.3.2.1 Reglas difusas

El sistema de inferencia se basa en un sistema de estas reglas construidas por medio del conocimiento humano. Estas reglas son del tipo “Si – Entonces”. Una regla difusa de este tipo es un enunciado en donde ciertas palabras son caracterizadas por funciones de pertenencia. Estas reglas describen en palabras las relaciones entre los datos de entrada y de salida, y conectan un antecedente con un consecuente.

Existen dos maneras principales para obtener las reglas difusas:

1. A partir de la información derivada del conocimiento de expertos, generalmente mediante métodos descriptivos como un cuestionario;
2. Mediante datos empíricos conseguidos por métodos cognitivos como redes neuronales.

El número total de reglas difusas en un proceso de inferencia difusa está representado por la siguiente fórmula (Klir y Yuan, 1995):

$$N_{reglas} = n_{fs}^{n_v} \quad [4.9]$$

Donde:

N_{reglas} es el número de reglas;

n_{fs} es el número de conjuntos difusos;

n_v es el número de variables.

A continuación, se muestra un ejemplo de una regla difusa:

“Si la temperatura es **fría** “Y” la temperatura deseada es **moderada** “ENTONCES” el calentador debe estar en potencia **baja**.”

Las reglas difusas contienen operadores. En el ejemplo anterior mencionado, el conector “Y” representa una intersección de dos conjuntos difusos en el antecedente y puede ser operado por dos métodos: El del mínimo y del producto (Thole et al., 1995). También existen otros operadores como el “O” que representa la unión de los conjuntos difusos o el “NO” que representa una negación; a continuación, estos operadores se explican con más detalle.

Generalmente, es necesario tratar con más de una variable de entrada. En este caso la parte del antecedente está construida con operadores difusos. Por lo tanto, las múltiples variables pueden estar relacionadas mediante operadores lógicos basados en las operaciones de conjuntos difusos de acuerdo a las siguientes relaciones:

- Operador lógico NO \rightarrow Complemento difuso;
- Operador lógico Y \rightarrow Intersección difusa;
- Operador lógico O \rightarrow Unión difusa.

Las operaciones con conjuntos difusos son extensiones a aquellas correspondientes de los conjuntos clásicos. Considerando dos conjuntos difusos A y B, se puede decir que:

- A y B son iguales ($A = B$) sólo y sólo si $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ para cada x en X .
- Un conjunto difuso A está vacío si y sólo si su función de pertenencia es cero en X .
- El complemento de un conjunto difuso A representado por \bar{A} , está definido como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad [4.10]$$

- La intersección $A \cap B$ está definida como:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad [4.11]$$

- La unión $A \cup B$ está definida como:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad [4.12]$$

No obstante las diferencias presentadas entre estas dos aproximaciones, si se considera un intervalo de $[0,1]$, las operaciones clásicas y difusas son las mismas tal como se muestra en las figuras 4.4 y 4.5.

A	B	A y B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Y

A	B	A o B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

O

A	No A
0	1
1	0

NO

Figura 4.4. Operaciones lógicas entre conjuntos clásicos.

A	B	min(A,B)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Y

A	B	max(A,B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

O

A	1 - A
0	1
1	0

NO

Figura 4.5. Operaciones lógicas entre conjuntos difusos.

Para mostrar un ejemplo de las operaciones con conjuntos difusos y sus operadores, se establece la siguiente regla: “Si X_1 es POBRE y X_2 es MEDIANO entonces Z es ALTO”. La función de pertenencia relacionada al conjunto difuso POBRE es de forma trapezoidal mientras que la función de pertenencia relacionada al conjunto difuso MEDIANO es de forma triangular. Considerando que $X_1 = 3$ y $X_2 = 2,75$ (Figura 4.6), de acuerdo con las ecuaciones 4.6 y 4.5, respectivamente, el grado de pertenencia para el conjunto POBRE representado por X_1 y para el conjunto MEDIANO por X_2 son:

$$\mu_{POB}(X_1 = 3) = 0,5$$

$$\mu_{MED}(X_2 = 2,75) = 0,25$$

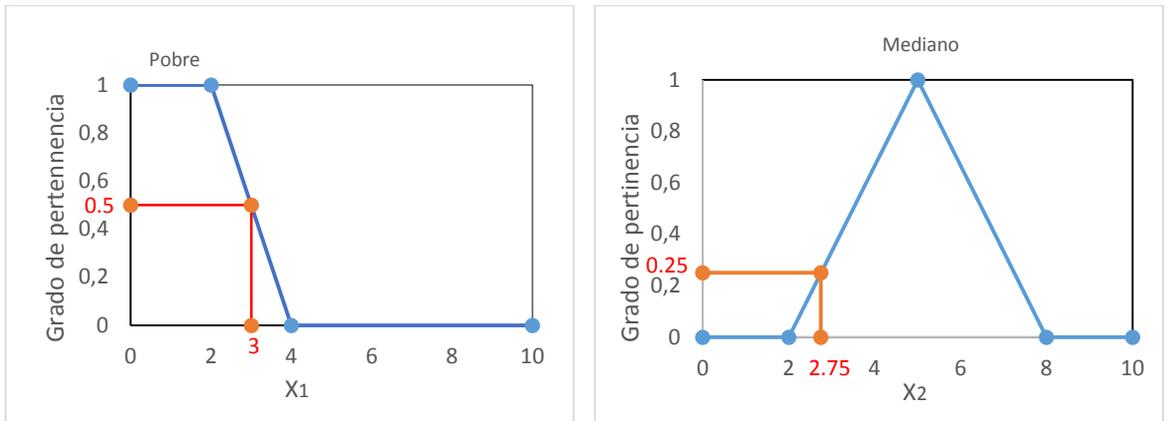


Figura 4.6. Determinación gráfica de los grados de pertenencia.

Si consideramos el operador Y, el cual es el más usado, se pueden aplicar dos métodos: el método del MINIMO y el del PRODUCTO.

Con respecto al ejemplo anterior, el valor de salida obtenido con el método del “mínimo” es el valor mínimo entre los dos grados de pertenencia considerados:

$$\mu_{OUT} = \min(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}) = \min(0,5, 0,25) = 0,25$$

Mientras que el valor de salida usando el método del “producto” es el producto entre dos grados de pertenencia:

$$\mu_{OUT} = \mu_{X_1} \times \mu_{X_2} = 0,5 \times 0,25 = 0,125$$

El siguiente paso del proceso de inferencia difusa es el establecimiento de los pesos de las variables.

4.3.2.2 Establecimiento de los pesos de las variables

Aunque en la metodología de la lógica difusa éste no es un paso obligatorio, en esta tesis se ha decidido llevarlo a cabo. El peso puede ser definido como la importancia de la variable, ya que algunas variables pueden ser consideradas más importantes que otras. Kahraman et al. (2003) estableció que existen diferentes métodos para obtener el peso de las variables como: el método de súper escala, el método de entropía y el proceso de jerarquización analítica (AHP). Siendo este último el más utilizado para cuantificar la importancia.

Una de las principales ventajas de este método es que es relativamente sencillo para manejar múltiples criterios y que puede manejar tanto datos cuantitativos como cualitativos. Saaty (1990) expuso que este método utiliza los principios de la descomposición, comparación por pares y de la generación del vector prioritario con el fin de capturar el conocimiento de los expertos que se obtiene generalmente del uso de un cuestionario. Para llevar a cabo esta evaluación se necesita seguir una serie de pasos los cuales se explican a continuación.

4.3.2.2.1 Elección de una escala de comparación

La primera etapa del método AHP es la elección de una escala de comparación con el fin de determinar los valores de los elementos de la matriz. En general, este rango tiene una escala del 1 al 9 (Gass, 2004; Ocampo, 2006). Las explicaciones y definición de los valores escogidos se encuentran en la tabla 4.1. Los números 2, 4, 6, 8 no están presentes en la tabla porque, aunque se podrían utilizar para representar estados intermedios, usar 9 opciones diferentes para comparar entre dos variables sería muy complicado para que los expertos lo valoraran.

Tabla 4.1. Escala usual de comparación.

Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen de igual manera al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente a un elemento comparado con otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento comparado con otro
7	Importancia muy fuerte	Un elemento es favorecido con mucha fuerza sobre otro y esto se demuestra en la práctica
9	Extremadamente importante	La evidencia que favorece un elemento sobre otro es la más alta posible

4.3.2.2.2 Construcción de una matriz de comparación A

En la metodología AHP, el segundo paso es la comparación por pares de los parámetros. Esta comparación está basada en un conjunto de valores numéricos que representan la importancia de cada parámetro. La siguiente ecuación define la matriz:

$$A = (a_{ij}), i, j = 1, \dots, n \quad [4.13]$$

Donde:

n es el número de parámetros;

a_{ij} es el elemento de la matriz que representa el factor de comparación por pares.

En la diagonal de la matriz A el elemento a_{ii} es igual a 1. Por lo tanto, los elementos de la matriz satisfacen otras dos condiciones:

$$a_{ij} > 0;$$

$$a_{ij} = 1/a_{ji}, i, j = 1, \dots, n$$

Entonces, considerando que tenemos tres parámetros, la representación general de la matriz A es:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 \end{pmatrix} \quad [4.14]$$

4.3.2.2.3 Transformación de la matriz A

El siguiente paso es realizar la transformación de la matriz A que se realiza por medio de la “descomposición de valores singulares” (DVS), que es una herramienta que nos permite transformar la matriz general A en un producto de tres matrices, cada una de ellas tiene una forma e interpretación geométrica especial (Gass, 2004). La representación de la DVS está basada bajo el siguiente teorema:

Cualquier matriz real ($m \times n$) A de rango k ($k \leq \min(m, n)$), puede ser expresada de la siguiente manera,

$$A = UDV^T \quad [4.15]$$

Donde:

D es la diagonal de la matriz con elementos positivos $\alpha_1, \dots, \alpha_k$;

U es una matriz tipo ($m \times k$) y $U^T U = 1$;

V es una matriz tipo ($n \times k$) y $V^T V = 1$.

4.3.2.2.4 Cálculo de los vectores prioritarios

Una vez la matriz de comparación es construida usando la escala de comparación elegida, se transforma en el producto de tres nuevas matrices a través de la DVS. La ecuación que lleva a los vectores prioritarios es:

$$w_i = \frac{u_i + \frac{1}{v_i}}{\sum_{j=1}^n \left(u_j + \frac{1}{v_j}\right)}, i = 1, \dots, n \quad [4.16]$$

Donde u y v son los vectores singulares derecho e izquierdo pertenecientes al valor más alto de A , que es la matriz ($m \times n$) con los valores: $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_n$.

4.3.2.2.5 Medición de la consistencia

La matriz A , usada para establecer los pesos, se basa en la opinión de los expertos; sin embargo, sólo las respuestas consistentes son usadas. Para hacer esta selección, el último paso para obtener los pesos es medir la consistencia de cada respuesta de los expertos basada en la DVS.

La consistencia de la comparación de las pares de matrices se puede llevar a cabo usando la norma de Frobenius. El límite superior de la norma de Frobenius de una matriz consistente A es:

$$\|\tilde{A}\|_F^2 \leq \frac{(M + m)^2}{4Mm} n^2 \quad [4.17]$$

Donde M y m son parámetros positivos basados en la no equidad de Schweitzer:

$$\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j\right) \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{a_j}\right) \leq \frac{(M + m)^2}{4Mm} \quad [4.18]$$

Por ejemplo: $M = (\max_{i,j} a_{i,j})^2$ y $m = (\min_{i,j} a_{i,j})^2$.

Si el peso del vector es considerado para generar un matriz \tilde{A} positiva y consistente especificando w_i/w_j para cada par de i, j , la medida de consistencia para A puede ser representada por:

$$\|A - \tilde{A}\|_F \quad [4.19]$$

Finalmente, usando la ecuación 4.20, el índice final de consistencia que se utiliza para establecer cuál de las respuestas de los expertos son consideradas para determinar la matriz final de comparación A, puede ser definido como:

$$CM = \frac{\|A - \tilde{A}\|_F}{\|A\|_F + \|\tilde{A}\|_F} \quad [4.20]$$

Donde:

CM es el índice de consistencia;

$\|\tilde{A}\|_F$ es el límite superior para la matriz consistente \tilde{A} .

Si $CM < 0,1$, la decisión escogida es aceptable y se puede decir que es una matriz consistente.

Resumiendo, una vez establecida la escala de comparación, se determina la matriz de comparación A para cada respuesta de los expertos. Se calculan los pesos de las variables para cada una de las matrices, y una vez identificados los parámetros M y m de no equidad de Schweitzer, las respuestas inconsistentes son identificadas y excluidas, lo que permite que la matriz final de comparación y los pesos de las variables puedan ser determinados.

Una vez que ya se tienen establecidas todas las reglas difusas y los pesos de las variables, se continúa con el proceso de inferencia difusa. El siguiente paso según la figura 4.2 es el proceso de implicación.

4.3.2.3 Implicación

El conector lógico “Entonces” que se encuentra en las reglas difusas representa la implicación entre el antecedente y el consecuente. En este proceso de implicación, el valor de entrada es sólo un solo valor dado por el antecedente, en cambio, el valor de salida es un conjunto difuso. El proceso de implicación debe de ser realizado para cada regla.

De igual manera que antes, existen dos métodos diferentes para aplicar el proceso de implicación, los dos más comúnmente usados son el del “mínimo” y el del “producto”. Para explicar las diferencias entre estos dos métodos de implicación, se muestra un ejemplo en la figura 4.7. En este ejemplo una variable de salida tiene tres funciones de pertenencia con pesos de regla de 0,5, 0,8, y 0,3, respectivamente.

En el método de implicación “mínimo”, el controlador difuso trunca en el valor de salida de la función de pertenencia de cada regla, de esta manera el resultado gráfico quedaría como se muestra en la siguiente figura 4.7.

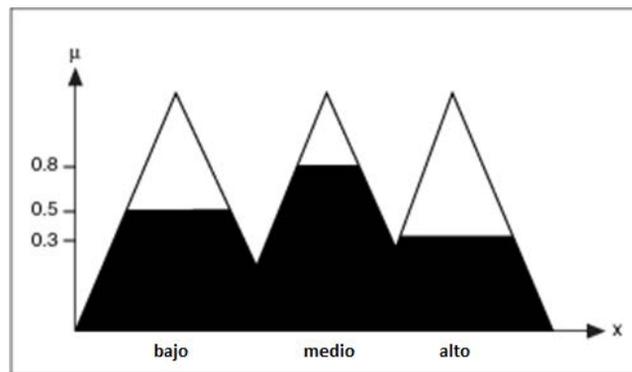


Figura 4.7. Método de implicación mínimo (LabWorks, 2013).

En el método del “producto”, el controlador difuso escala el valor de salida de la función de pertenencia de cada regla, tal como se puede apreciar en la figura 4.8.

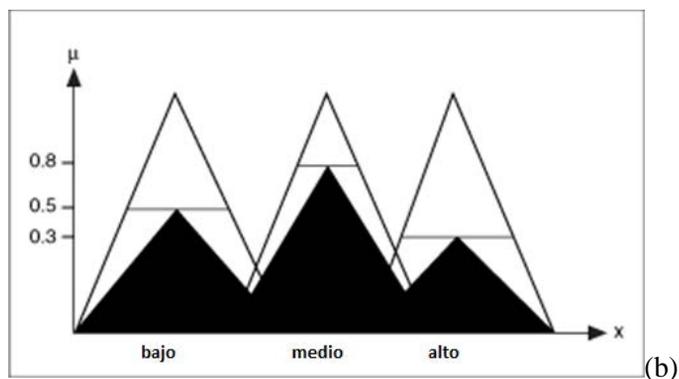


Figura 4.8. Método de implicación del “producto” (LabWorks, 2013).

En donde:

- μ , es el grado de pertenencia;
- x , es el valor de la variable lingüística
- La parte sombreada de la figura, representa el área obtenida bajo las funciones de pertenencia.

Después de realizada la implicación de todas las reglas se necesita realizar el último paso del proceso de inferencia: la agregación.

4.3.2.4 Agregación

Se entiende como el proceso en donde los conjuntos difusos que representan los datos de salida de cada regla son combinados en un solo conjunto difuso. Es el proceso en el que se hace la unión de los resultados de todas las reglas justo antes del último paso de la metodología de la lógica difusa, la “desfusificación”. Este proceso también cuenta con dos operadores posibles para seguir el proceso de agregación:

- El método de agregación máxima que junta las áreas más grandes de los conjuntos difusos de cada consecuente.

$$\mu_A(z) = \max\{\mu_{A_1}(z_1), \mu_{A_2}(z_2), \dots, \mu_{A_n}(z_n)\} \quad [4.21]$$

- El método de agregación por sumatorios que suma todas las áreas de cada consecuente:

$$\mu_A(z) = \text{sum}\{\mu_{A_1}(z_1), \mu_{A_2}(z_2), \dots, \mu_{A_n}(z_n)\} \quad [4.22]$$

Donde:

A , es la salida difusa final del sistema;

A_1, A_2, \dots, A_n , son los conjuntos difusos obtenidos con la implicación para todas las reglas.

z_1, z_2, \dots, z_n , son los elementos de los conjuntos difusos A_n .

En la figura 4.9 se muestra un ejemplo grafico del método de agregación máxima, que es el que se ha utilizado en esta tesis.

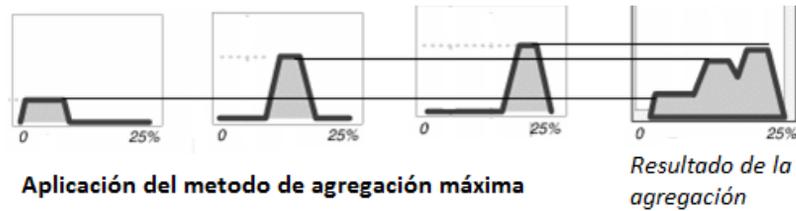


Figura 4.9. Representación del método de agregación máxima (MathWorks, 2010).

Para acabar con el proceso, se debe proceder con la defusificación.

4.3.3 Defusificación

Del proceso de inferencia difusa se obtienen los resultados del modelo que son llamados “estimados difusos”; por lo tanto, se tienen que defusificar para obtener un resultado tangible. El proceso de defusificación (figura 4.2) se encarga de combinar los resultados de cada regla en un resultado cuantitativo único, es decir, transforma los resultados difusos resultantes de la evaluación de las reglas en una salida precisa. Este es el último paso de la metodología de la lógica difusa. Existen 6 diferentes métodos de defusificación (Sivanandam et al., 2007):

- Principio de la pertenencia máxima.
- Método del centroide.
- Método del peso promedio.
- Pertenencia media máxima.
- Suma de centros.
- Suma del área más grande.

Sin embargo, el más comúnmente utilizado es el método del centroide que también es llamado método del área central y se puede definir por la siguiente expresión algebraica:

$$z^* = \frac{\int \mu(z) * z dz}{\int \mu(z) dz} \quad [4.23]$$

Donde:

Z^* es la salida numérica final;

$\mu(z)$ es la función de pertenencia de la salida;

z es el valor de salida después del proceso de inferencia difusa

La figura 4.10 representa gráficamente este método de defusificación.

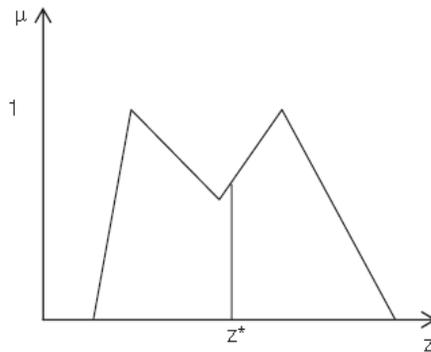


Figura 4.10. Método del Centroide.

De esta manera, después de terminar el proceso de la lógica difusa, podemos llegar a un valor numérico obtenido a partir de las variables y los conjuntos difusos establecidos. Debido a la naturaleza cualitativa de los factores humanos, estos pueden ser representados por variables lingüísticas y conjuntos difusos y se puede aplicar esta metodología para reducir la incertidumbre en el cálculo de las frecuencias. Para ello se necesita establecer un modelo que represente las variables (factores humanos) que se tomarán en cuenta, esto se presenta en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA BASADA EN LA LÓGICA DIFUSA

En este capítulo se explica una de las metodologías desarrollada en esta tesis, basada en la lógica difusa, para introducir el factor humano en el cálculo de las frecuencias de los accidentes. Se explica el concepto del modificador difuso de la frecuencia que ha sido la herramienta central para llevar a cabo tal tarea. Después, se explica cada uno de los pasos para obtener este modificador comenzando por la identificación de las variables del modelo representadas por diferentes factores humanos. A continuación, se explica el método de fusificación, en donde se establecen los conjuntos difusos y las funciones de pertenencia necesarias. Antes de continuar con el proceso de inferencia difusa, se presentan los resultados obtenidos a través de un cuestionario contestado por los expertos que permite seguir con el proceso de inferencia difusa que se presenta posteriormente. Finalmente, se explica el proceso de implicación y agregación para llegar al último paso de la metodología para obtener el modificador: la defusificación.

5.1 Modificador difuso de la frecuencia de accidentes

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, entender y cuantificar el factor humano y la incertidumbre que éste genera no es tarea sencilla debido a su naturaleza y a la cantidad tan amplia de variables que pueden relacionarse cuando se habla del mismo. Por lo tanto, es normal que la industria química lo deje en algunas ocasiones a un lado. La lógica difusa, presentada en el capítulo anterior, es una metodología dedicada a tratar este tipo de incertidumbre causada por el factor humano.

Para introducir el factor humano en el cálculo de la frecuencia, se utilizó un modificador difuso de la frecuencia (m_{fh}) que multiplica a una frecuencia inicial representada por la variable $f_{inicial}$ en la ecuación [5.1]. Esta frecuencia inicial corresponde a un valor de frecuencia genérica obtenida de una de las bases de datos comentados en el capítulo II, el BEVI (BEVI, 2009), ya que este no incluye el factor humano en sus estimaciones.

$$f_{final} = f_{inicial} \times m_{fh} \quad [5.1]$$

Se estableció que este modificador varía en un rango de 1 a 1,5. Esta elección se hizo tomando en cuenta que la HSE (*Health and Safety Executive*) establece que en la industria petroquímica los accidentes atribuidos al factor humano corresponden al 50% de los accidentes (HSE, 1999). Esto significa que en el mejor escenario posible (cuando no exista afectación de los factores humanos) el valor de la frecuencia genérica de accidentes no será cambiado por el modificador difuso, por lo tanto, el valor del modificador será 1.

En cambio, en el peor de los escenarios (cuando todos los factores humanos contribuyan al máximo) el valor del modificador tendrá un valor de 1,50 por lo que la frecuencia genérica de accidentes sufrirá un incremento del 50% en su valor.

Este modificador se obtiene a partir de la metodología de la lógica difusa, y por ello se han seguido los mismos pasos ya presentados en el capítulo IV para la obtención de este modificador (Figura 5.1). De todas maneras, estos pasos han sido adaptados y modificados

para conseguir el objetivo de esta tesis, introduciendo aspectos como los resultados del cuestionario que permiten enriquecer el proceso de inferencia difusa.



Figura 5.1. Metodología de la lógica difusa.

Para poder obtener el valor del modificador se utilizó una herramienta del software computacional MatLab (Mathworks, 2013) llamada “Fuzzy Logic Toolbox”, en donde fue posible introducir los datos necesarios para poder desarrollar la metodología propuesta. En los siguientes pasos de la metodología se explicará también como fueron introducidos los datos en este software.

Tal como dice la metodología de la lógica difusa (Capítulo IV), existen tres pasos fundamentales: la fusificación, el proceso de inferencia difusa y la desfusificación. El valor numérico del modificador se obtiene después de este último paso de la lógica difusa. A continuación se explican cada uno de dichos pasos.

5.2 Fusificación

Como se observa en la Figura 5.2, el primer paso es la fusificación por lo que las variables de entrada del modelo, que en este caso son factores humanos, deben ser expresadas por conjuntos difusos y ser representadas por funciones de pertenencia.

5.2.1 Identificación de las variables

Ya que el objetivo es incluir el factor humano en la frecuencia, y siendo este factor tan extenso se decidió que las variables a incluir se basaran en la definición de la HSE presentada en el capítulo III, en donde se dice que una manera simple de ver los factores humanos es pensar en tres aspectos: el factor trabajo, el factor individual y el factor organizacional.

Por lo tanto, los tres factores en lo que se basa el modelo son: El factor organizacional, el factor de las características del trabajo y el factor de las características personales, tal como se observa en la Figura 5.2.

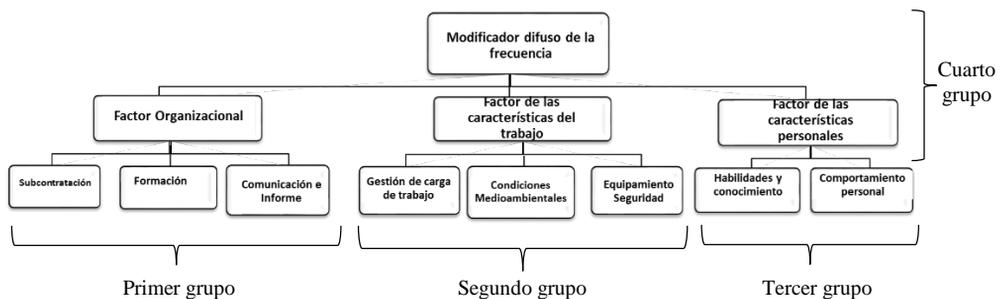


Figura 5.2. Diseño de las variables del modelo.

Cada uno de estos factores corresponden a los 3 primeros grupos del modelo y lo componen diferentes variables, la combinación de los tres factores (organizacional, características del trabajo y características personales) componen el modificador difuso de la frecuencia (cuarto grupo). Las variables de cada uno de los factores se explican a continuación.

5.2.1.1 Factor Organizacional

Este factor se refiere a las condiciones que la compañía establece para generar un ambiente seguro. Y contiene las siguientes tres variables:

5.2.1.1.1 Subcontratación

Los accidentes que ocurren dentro de las empresas no sólo ocurren al personal contratado directamente por la empresa, muchas veces ocurren al personal sub-contratado a empresas externas. Por lo tanto, este parámetro se refiere a los criterios que una compañía establece en el momento de contratar personal externo para asegurar que tengan la experiencia técnica y en seguridad suficiente para evitar accidentes. La empresa también debe asegurarse que antes de entrar en sus instalaciones el personal externo debe de haber recibido instrucciones de seguridad apropiadas.

5.2.1.1.2 Formación

Este parámetro habla sobre la formación que la compañía ofrece a sus empleados para mejorar el conocimiento que poseen y así poder desarrollar las tareas que se le asignan adecuadamente, sobre todo aquellas que son específicas y de un grado de peligrosidad alto. La compañía debe tener un programa de formación definido impartido por personal certificado y que debe de ser continuamente evaluado.

5.2.1.1.3 Comunicación e Informe

Este parámetro toma en cuenta el grado de comunicación entre los diferentes niveles jerárquicos dentro de la organización de acuerdo a sus roles y responsabilidades. También se refiere a la cultura de informar cuando un accidente ocurre.

5.2.1.2 Factor de las características del trabajo

Este factor incluye las condiciones que la empresa da a sus trabajadores para poder realizar su trabajo con el menor riesgo posible e incluye también 3 variables diferentes:

5.2.1.2.1 Gestión de la carga de trabajo

Este parámetro se refiere a la gestión de la cantidad de trabajo que se le asigna a cada empleado. Un exceso de horas de trabajo en un trabajador puede afectar en el rendimiento y desempeño de la tarea asignada. Es importante que la compañía tenga una planificación de

los horarios de trabajo, turnos, descansos, y tiempo extra de los trabajadores. De esta manera, se podrá evitar la fatiga y efectos adversos en los empleados que pueden llegar a causar un incidente.

5.2.1.2.2 Condiciones medioambientales

Este parámetro se refiere a las condiciones del lugar de trabajo como el ruido y las condiciones del aire. El ruido puede afectar la habilidad para desarrollar la tarea asignada. De acuerdo con el estándar OSHAS (*Occupational Health and Safety Assessment Serie*) (OHSAS 18001, 2007) si las condiciones de trabajo superan un ruido mayor a 90 dBA, el trabajo a realizar queda comprometido así como la salud del trabajador. Por otra parte la calidad del aire depende de varios parámetros como la humedad, temperatura, contaminantes y la ventilación. Unas condiciones pobres del aire pueden crear náuseas, dolores de cabeza o problemas de concentración que pueden causar un incidente. La EPA (*environmental protection agency*) (EPA, 2010) regula un índice de calidad del aire (AQI) de escala de 0 a 500, en donde si los valores sobrepasan de 150, la calidad del aire es considerada no apta para el óptimo desarrollo del trabajo.

5.2.1.2.3 Equipamiento de Seguridad

Este parámetro se refiere al equipo de protección que los empleados deben de llevar puesto en todo momento mientras se encuentren en el área de proceso (gafas de seguridad, cascos, tapones de oído, guantes). También se refiere a los equipos de seguridad que la planta debe de tener como duchas, señalizaciones, etc., que deben de estar apropiadamente ubicados en toda la zona de proceso.

5.2.1.3 Factor de las características personales

Este factor se refiere a las características cognitivas de los trabajadores y se refiere más a la persona (empleado) y no en las condiciones que provee la compañía. Este factor incluye las siguientes dos variables:

5.2.1.3.1 Habilidades y conocimientos

Este parámetro se refiere a la capacidad y competencia de los trabajadores para entender las tareas que se les asignan. El empleado debe tener un conocimiento mínimo acerca de los

procesos químicos, equipo y seguridad. La falta de este conocimiento puede suponer un riesgo y como consecuencia un incidente potencial. También se incluye en este parámetro la experiencia que el trabajador va adquiriendo y como esto ayuda a los demás trabajadores.

5.2.1.3.2 Comportamiento personal

Este parámetro se refiere a las actitudes, hábitos y personalidad del empleado que normalmente son fijas y no pueden ser cambiadas e incluye la atención, motivación que el trabajador le presta a su trabajo. Dentro de esta variable también se incluye la capacidad de trabajar en equipo.

5.2.2 Definición de los conjuntos difusos

Tal y como se vio en el capítulo IV, una vez definidas las variables, el siguiente paso es asignar los conjuntos difusos (Figura 5.1). Para cada una de las variables establecidas se definieron tres conjuntos difusos de acuerdo con las condiciones del mismo: pobre, aceptable y excelente. A continuación, se muestra como ejemplo los conjuntos difusos establecidos para la variable subcontratación del factor organizacional (Tabla 5.1). Los demás conjuntos difusos del resto de las variables de todos los factores del modelo siguen un esquema parecido y se encuentran en el anexo A.

Tabla 5.1. Conjuntos difusos para la variable contratación.

Pobre	Los empleados externos contratados no tienen un conocimiento mínimo sobre seguridad. Antes de entrar a las instalaciones los empleados externos no son dotados de ningún tipo de instrucciones de seguridad.
Aceptable	Se comparan diferentes opciones en el momento de contratar el personal externo pero sin un criterio claro. Antes de entrar a las instalaciones los empleados externos son dotados de instrucciones básicas de seguridad.
Excelente	La compañía se asegura de que el mejor personal externo es contratado por medio de un proceso de selección basado en el conocimiento de la seguridad. Antes de entrar a las instalaciones los empleados externos son dotados de un curso de seguridad completo.

En el caso de los conjuntos difusos para la salida final ocasionada por el grupo 4 (modificador difuso de la frecuencia) se utilizaron 5 conjuntos difusos: Muy alta afectación, alta afectación, media afectación, baja afectación y muy baja afectación.

Para mayor entendimiento de estos conjuntos difusos se da el siguiente ejemplo de regla difusa: “si el factor organizacional es POBRE, el factor de las características del trabajo es POBRE y el factor de las características personales es POBRE, entonces el modificador difuso de la frecuencia tendrá MUY ALTA AFECTACION”. Esto significa que el modificador afectará mucho a la frecuencia, obteniendo valores mayores debido a las condiciones pobres de los factores. En este caso se espera que el modificador tenga valores altos, cercanos a 1,50.

Por otra parte, cuando el experto establezca que los factores tengan condiciones excelentes, esto significará que el modificador difuso afectará poco a la frecuencia, por lo tanto, los valores del modificador se acercarán a 1 y no existirá un cambio significativo en su valor.

Una vez establecidas las variables y los conjuntos difusos, se tienen que establecer las funciones de pertenencia que se usarán.

5.2.3 Establecimiento de las funciones de pertenencia

Como se explicó anteriormente, el último paso para el proceso de la fusificación es establecer el tipo y los parámetros de las funciones de pertenencia que relacionan las variables con los conjuntos difusos. En este estudio se han utilizado 3 tipos diferentes de funciones de pertenencia:

- Funciones de pertenencia de forma Z, las cuales se han utilizado para los siguientes conjuntos difusos: POBRE perteneciente a los tres primeros grupos de variables y MUY BAJA AFECTACIÓN para el cuarto grupo. Para poder implementar estas funciones, es necesario conocer dos parámetros (a y b) y se representan por:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad [5.2]$$

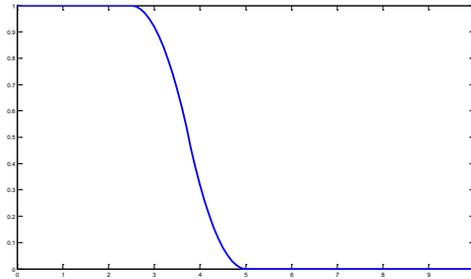


Figura 5.3. Ejemplo de una función de pertenencia de tipo Z.

- Funciones de pertenencia de forma S, las cuales han sido utilizadas para los conjuntos difusos superiores, tales como EXCELENTE de los tres primeros grupos o MUY ALTA AFECTACIÓN del cuarto grupo. En este tipo de funciones son necesarios también dos parámetros (a y b) y se representan por:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad [5.3]$$

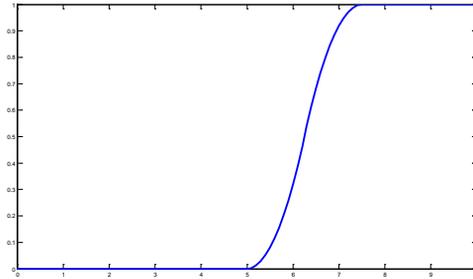


Figura 5.4. Ejemplo de función de pertenencia de tipo S.

- Funciones de pertenencia de forma II, las cuales han sido utilizadas para los conjuntos difusos intermedios, es decir, la categoría ACEPTABLES de los 3 primeros grupos de variables. También se utilizó para las categorías ALTA AFECTACION y BAJA AFECTACION del grupo 4 de variables. Para este tipo de función es necesario determinar cuatro parámetros (a, b, c y d) y se representan por:

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ 1 - 2\left(\frac{x-c}{d-c}\right)^2, c \leq x \leq \frac{c+d}{2} \\ 2\left(\frac{x-d}{d-c}\right)^2, \frac{c+d}{2} \leq x \leq d \\ 0, x \geq d \end{cases} \quad [5.4]$$

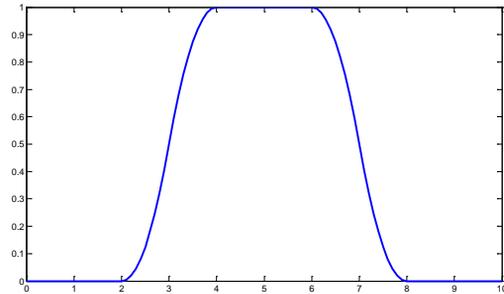


Figura 5.4. Ejemplo de una función de tipo π .

Estas funciones fueron seleccionadas porque permiten pasar de un conjunto difuso a otro de una forma gradual, además de que los parámetros necesarios para definir estas funciones no son tan numerosos comparado con otras.

Las variables, conjuntos difusos y las funciones de pertenencia se definen en la herramienta “*Fuzzy Toolbox*” como se muestra en la Figura 5.5. En la parte superior izquierda de esta figura se aprecian las variables que componen el factor organizacional (contratación, formación, comunicación y transporte). Se define también el conjunto difuso POBRE de la variable contratación especificando el tipo de función de pertenencia de la misma.

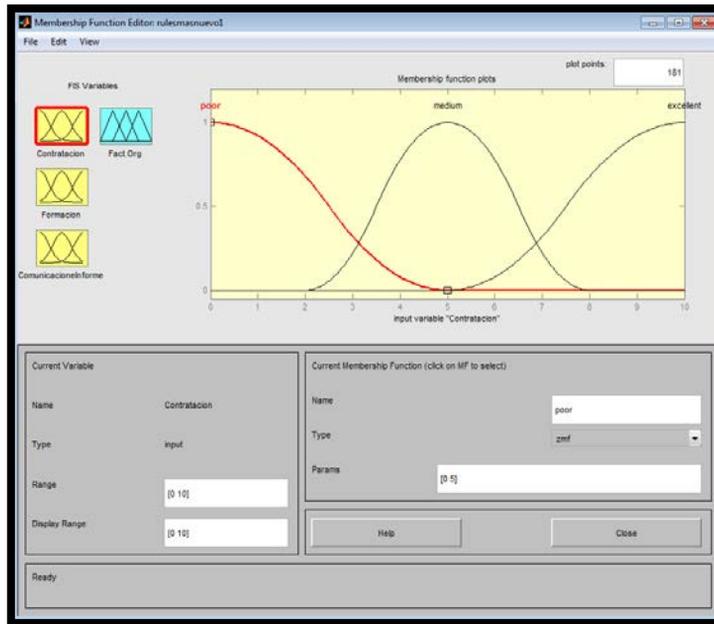


Figura 5.5. Elección de la función de pertenencia para conjunto difuso pobre.

Hasta este punto, ya se han definido todos los parámetros y, por lo tanto, ya se ha acabado la primera parte de la metodología de la lógica difusa: la fusificación. De acuerdo con el esquema presentado en la Figura 5.1, para llegar a la siguiente etapa de la metodología, llamada el proceso de inferencia difusa, han sido necesarios los datos recogidos mediante un cuestionario contestado por expertos. Éste se presenta en la siguiente sección.

5.3 Cuestionario

Una parte fundamental de este proceso y que es la base de este método son las reglas difusas. Como se ha indicado en el capítulo IV, una de las principales fuentes para obtener estas reglas es a través del conocimiento de los expertos. Esta información puede ser obtenida mediante métodos descriptivos como son los cuestionarios.

Por lo tanto, se creó un cuestionario para obtener la información necesaria para completar la formación de estas reglas difusas. Dentro del cuestionario, se encuentran las instrucciones

para la formación de las reglas difusas en donde entran en juego las definiciones de los conjuntos difusos previamente explicadas.

Con los datos que se han establecido en la sección anterior se pueden crear ya los antecedentes de estas reglas para que el experto lo complete con el consecuente.

Un ejemplo de una regla que los expertos pudieron formar es:

“*SI* la contratación es POBRE, *Y* la formación es POBRE, *Y* la comunicación e informe es POBRE, *ENTONCES* el factor organizacional tendrá ALTA AFECTACION en el modificador difuso de la frecuencia”

Como ya se ha comentado, esto significa que si las condiciones de las variables son pobres el modificador difuso tendrá un valor mayor, implicando una variación más grande de la frecuencia inicial, y por lo tanto causando un alto impacto. De manera contraria, si las variables son consideradas excelentes, el modificador tendrá un valor menor y no cambiará mucho la frecuencia. Otra información que se pretende obtener con la opinión de los expertos son los pesos de las variables, por lo que otra sección de este cuestionario está dedicada a este aspecto.

Por lo tanto, la información que se obtiene en este cuestionario ayuda a construir dos partes que son fundamentales para la siguiente etapa de la metodología:

- El consecuente de cada regla incluida en el sistema
- La evaluación y comparación entre las variables de cada grupo de ellas para poder asignarle un peso de acuerdo con la metodología AHP (Ver sección)

El cuestionario fue diseñado y enviado a expertos internacionales de tres diferentes ramas científicas: análisis de riesgo, lógica difusa y factores humanos. Para darle validez científica a este cuestionario, se hizo el envío a más de 160 expertos de todo el mundo. De estos, se pudo recolectar el conocimiento de 39 de ellos y sus respuestas son la base de esta parte de este estudio.

Un primer gráfico estadístico se muestra en la Figura 5.6, en donde se observa el porcentaje de los países de donde provienen las respuestas de los cuestionarios. Entre los países que se contó con mayor presencia fueron: España, Italia, Serbia, Francia, China y Reino Unido.

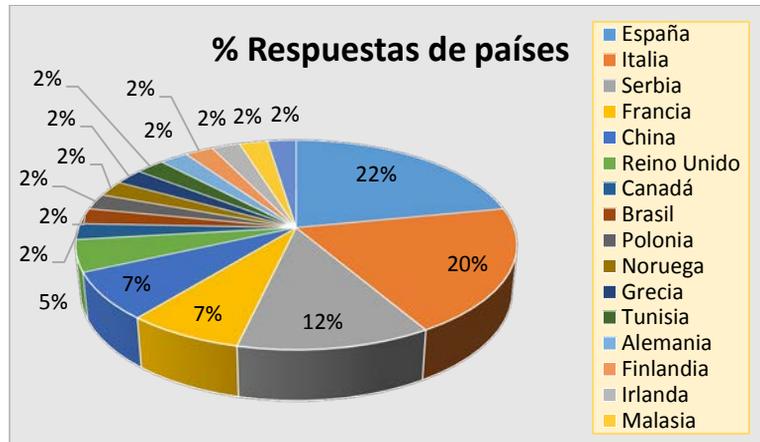


Figura 5.6. Países de donde se obtuvieron las respuestas del cuestionario.

5.3.1 Estructura del cuestionario

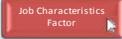
El cuestionario se realizó en formato Excel, incluyendo diferentes hojas de cálculo. En la primera de ellas, se explicó las instrucciones de cómo se debía llenar el cuestionario e información en general (Figura 5.7). En la siguiente, se presentó una introducción y explicación del proyecto y lo que se buscaba con éste, así como definiciones de conceptos involucrados con el proyecto (Figura 5.8). El cuestionario completo está contenido en el anexo B.

General Instructions and Information

For a better understanding of the questionnaire and to avoid confusions please read the information and follow the next instructions :

The questionnaire is divided in two parts: The rules formation and the establishment of weights. In each one of these parts you will be kindly asked to select different options.

If you need further information on any aspect of the questionnaire, please click on it and a brief description will be displayed:



If you need to save the document and continue later, please click on the save icon located in the left part of the sheet.

To move within the questionnaire use the icons at the bottom of each page.

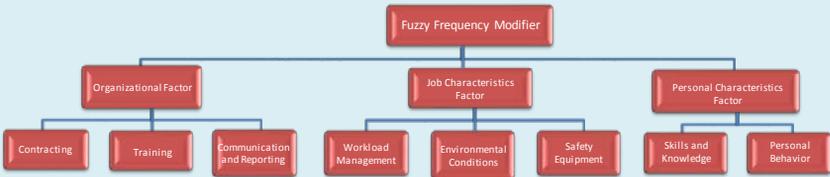
Figura 5.7. Instrucciones del cuestionario.

Introduction

The frequency calculation is one of the key aspects in the risk assessment field. The frequency of an accident scenario is most commonly assessed following a generic failure frequency approach, based on historical data and failure trees. There exist different sources of generic failure frequencies, the differences between them rely on the factors considered for their calculation.

Human Factor is an essential aspect to take into account in the frequency estimation. Therefore, the objective of this questionnaire is to evaluate the variables related to the human factor in order to introduce their contribution to the final value of frequency through a fuzzy logic modifier.

This modifier depends on the variables shown in figure 1. In the questionnaire you will be kindly asked, based on your experience, to answer a set of questions focus on two aspects that are necessary to build the model: The relative importance of the variables and their interconnection.



```
graph TD; A[Fuzzy Frequency Modifier] --> B[Organizational Factor]; A --> C[Job Characteristics Factor]; A --> D[Personal Characteristics Factor]; B --> B1[Contracting]; B --> B2[Training]; B --> B3[Communication and Reporting]; C --> C1[Workload Management]; C --> C2[Environmental Conditions]; C --> C3[Safety Equipment]; D --> D1[Skills and Knowledge]; D --> D2[Personal Behavior];
```

Figure 1. Diagram of the variables of the fuzzy frequency modifier model

Figura 5.8. Introducción del tema.

Las demás hojas de cálculo del cuestionario están divididas en dos secciones. La primera incluye la información necesaria para la construcción de las reglas difusas y la segunda sección se enfoca en obtener la información necesaria para conseguir los pesos de las variables. Al comienzo de cada una de estas secciones se proporcionó las instrucciones

necesarias para completarlas. A continuación, se explica la información que se brindó a los expertos en cada una de estas secciones.

5.3.2 Formación de las reglas en el cuestionario

Después de las instrucciones y la introducción del cuestionario, la siguiente parte del mismo fue dedicada a la elección de la parte del consecuente de las reglas de cada grupo de variables.

Las variables del modelo están agrupadas en cuatro grupos (Figura 5.2). Y de acuerdo con la ecuación [4.9] de la sección 4.4.2 $N_{reglas} = n_{fs}^{n_v}$, el número total de reglas difusas de este modelo son:

- 3^2 para el tercer grupo (9);
- 3^3 para el primer, segundo y cuarto grupo ($27 + 27 + 27$).

Esto es un total de 90 reglas difusas ($9 + 27 + 27 + 27$).

Por lo tanto, los expertos usaron su experiencia y conocimiento para completar el consecuente de estas reglas y poder formar las reglas difusas necesarias para la metodología.

Dentro del cuestionario enviado, se incluyeron las instrucciones para la formación de las reglas en donde se dio un ejemplo de la formación de una regla del factor organizacional. Cada vez que el experto hacía *click* en cada conjunto difuso, una descripción del mismo aparecía (Figura 5.9).

Instructions for the rules formation

The following rules relate a given condition (antecedent) to a conclusion (consequent) in the form of "if - then".

You are kindly asked to complete the following statements in order to create the rules. The structure of the rule is presented next and an example is given:

" IF the CONTRACTING is POOR and the TRAINING is POOR and the COMMUNICATION & REPORTING is POOR THEN the ORGANIZATIONAL FACTOR will have a HIGH IMPACT on the fuzzy frequency modifier.

ANTECEDENTS										CONSEQUENT				
IF	Contracting	Poor	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	High Impact	Low Impact	Medium Impact	High Impact
External employees are not required to have a minimum technical safety knowledge. Safety instructions are not provided when arriving to the company.			There is neither training program in the organization nor instructions for employees on how to perform their work.				The communication is not good enough since the roles and responsibilities are not clear. There are no procedures to report incidents in the company.							

If you place the mouse cursor on each set (Poor, Medium, Excellent), its description appears. Then, you should select in the consequent section, one of the options given for each of the lines. You need to complete all the consequent part until all the cells become in orange color.

Next you will find 4 slides in which you will be asked to fulfill the rules for the Organizational Factor, Job Characteristics Factor, Personal Characteristics Factor and the Fuzzy modifier.

Figura 5.9. Instrucciones de como seleccionar la parte consecuente de cada regla.

Mediante estas indicaciones, los expertos tuvieron la opción de crear las 90 diferentes reglas necesarias para introducir al modelo. A continuación, en las Figuras 5.10 y 5.11 se muestran las hojas de cálculo usadas en el cuestionario para la creación de las reglas del primer y del cuarto grupo, respectivamente.

Para el primer grupo de reglas que corresponde al factor organizacional, los expertos decidieron las 27 reglas en las que intervienen las variables de contratación, formación y comunicación e informe (Figura 5.10). De esta manera los expertos pudieron elegir como esta combinación de variables influyen en este factor. Un ejemplo de regla que se podía elegir en este grupo era:

“Si la contratación es POBRE y la formación es ACEPTABLE y la comunicación e informe es EXCELENTE entonces el factor organizacional tendrá una BAJA AFECTACIÓN o bien MEDIANA AFECTACIÓN o bien MUCHA AFECTACIÓN en el modificador de la frecuencia”, de acuerdo con la decisión del experto.

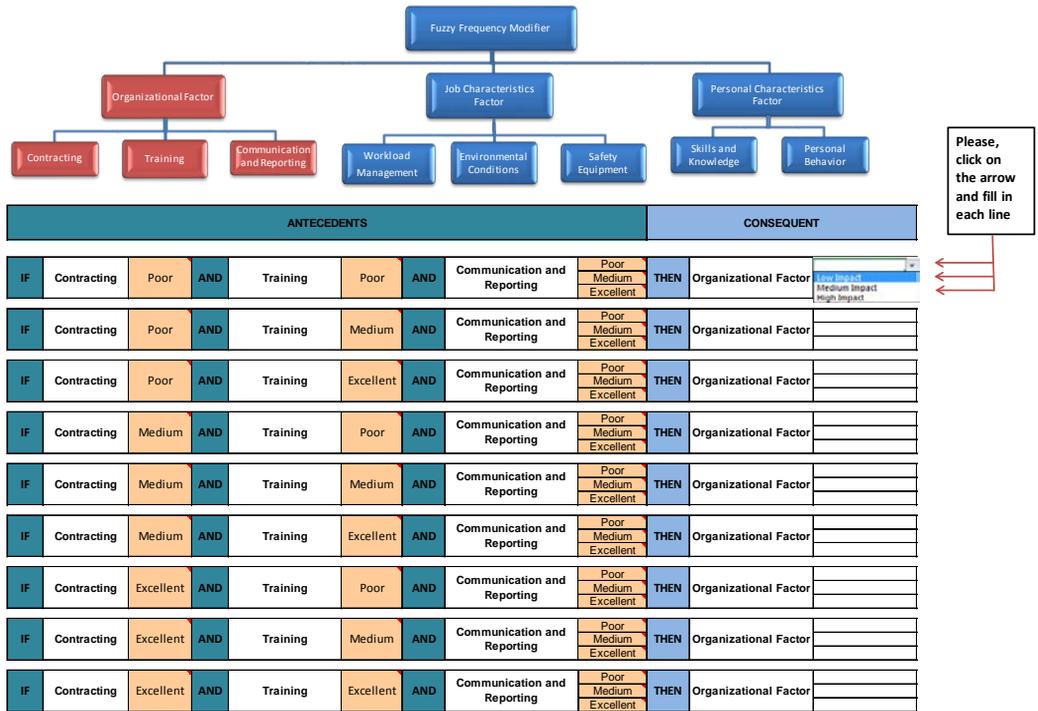


Figura 5.10. Formación de reglas del primer grupo.

Una vez que los expertos tenían una idea de lo que representaba cada uno de estos factores, también pudieron elegir como cada uno de ellos o la combinación de todos afectaba directamente al modificador difuso de la frecuencia en las últimas 27 reglas difusas (Figura 5.11). Un ejemplo de estas reglas sería:

“Si el factor organizacional es POBRE y el factor de las características del trabajo es ACEPTABLE y el factor de las características personales es EXCELENTE entonces el modificador difuso de la frecuencia tendrá una MUY ALTA AFECTACIÓN ó ALTA AFECTACIÓN ó MEDIA AFECTACIÓN ó BAJA AFECTACIÓN ó MUY BAJA AFECTACIÓN en el modificador de la frecuencia”, según escoja el experto.

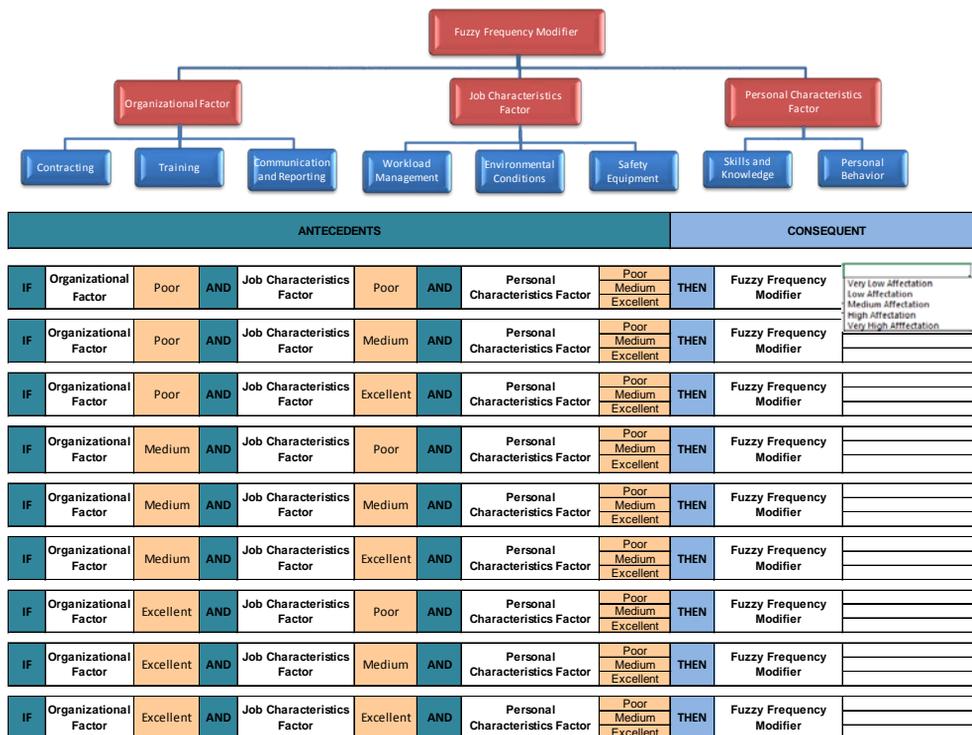


Figura 5.11. Formación de reglas del cuarto grupo.

La segunda parte del cuestionario corresponde a la obtención de los pesos de las variables, la cual se explica a continuación.

5.3.3 Estudio de los pesos de las variables en el cuestionario

Se necesitó también cierta información de los expertos para hacer una evaluación y comparación entre las variables de cada grupo para poder asignarle un peso de acuerdo con la metodología AHP explicada anteriormente.

Para llevar a cabo esto, y como se ve en la Figura 5.12, se dio indicaciones a los expertos para que pudieran escoger la expresión lingüística de comparación que consideraran más adecuada.

Instructions

When comparing the variables you will be asked for the importance between the ones available.

Example:

Between the Workload Management and the Environmental conditions, which parameter do you think is most important?

If you think the Workload Management is **MORE IMPORTANT** than the Environmental Conditions, you will mark the box as shown:

Workload Management

is
 Extremely Less Important
 Less important
 Equal important
 More important
 Extremely more Important
 than

Environmental Conditions

Figura 5.12. Instrucciones de llenado para la obtención del peso de las variables.

Para cada par de variables del modelo, los expertos pudieron escoger entre las diferentes opciones disponibles: extremadamente menos importante, menos importante, igual de importante, más importante y extremadamente más importante (Figura 5.13). De esta manera, los expertos pudieron elegir la importancia de entre diferentes pares de variables de un mismo grupo.

Establishment of Weights

Please select the best option according your criteria

Contracting	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Training
Contracting	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Communication and Reporting
Training	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Communication and Reporting
Workload Management	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Environmental Conditions
Workload Management	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Safety Equipment
Environmental Conditions	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Safety Equipment
Skills and Knowledge	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Personal Behavior
Organizational Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Job Characteristics Factor
Organizational Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Personal Characteristics Factor
Job Characteristics Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more Important	than	Personal Characteristics Factor

Figura 5.13. Estudio por pares de variables para obtención del peso.

Un ejemplo de un cuestionario completado por un experto elegido al azar se puede encontrar en el anexo C.

5.3.4 Resultados de los expertos

En esta sección se muestran los resultados de los expertos obtenidos mediante el cuestionario. Primeramente, se muestran los resultados de las 90 reglas en donde los expertos pudieron escoger el valor apropiado de salida de cada regla para poder formar el “consecuente” de la misma y luego se muestran los resultados para calcular los pesos de las variables.

En la Tabla 5.2 se muestra el número de expertos que respondieron a cada regla para el tercer grupo de variables del factor de las características personales (9 reglas). Para poder escoger el valor final del consecuente se siguió el siguiente criterio:

1. Cuando un consecuente ha sido elegido por los expertos en más del 50% de los casos, éste es elegido como el consecuente final.
2. Cuando no existe un consecuente elegido en más del 50% de los casos, la respuesta más conservadora es la elegida de entre los dos valores más votados.

El valor elegido para cada regla está representado en la siguiente tabla en color rojo. Este será el valor que será introducido en el modelo. Las demás respuestas de los expertos para los demás grupos de variables se encuentran en el anexo D.

Tabla 5.2. Opinión de los expertos para el tercer grupo de variables.

Reglas	Excelentes	Medias	Pobres
1	0	0	40
2	0	3	37
3	1	30	9
4	0	5	35
5	3	35	2
6	22	18	0
7	0	19	21
8	22	18	0
9	39	1	0

De esta manera, tomando en cuenta la parte consecuente elegida mayoritariamente por los expertos, se formaron las reglas que se introdujeron en el modelo. Por ejemplo, la primera regla final obtenida del cuestionario del tercer grupo de variables fue:

Regla 3: “Si las habilidades y conocimiento es POBRE y el comportamiento personal EXCELENTE *entonces* el factor organizacional tendrá una AFECTACIÓN MEDIA en el modificador de la frecuencia”.

En la Figura 5.14 se muestran las 9 reglas finales correspondientes al tercer grupo de variables “Factor de las características personales”. El resto de las reglas finales para los demás grupos de variables están contenidos en el anexo E.

ANTECEDENTS					CONSEQUENT			
IF	Skills and Knowledge	Poor	AND	Personal Behavior	Poor	THEN	Personal Characteristics Factor	poor
IF	Skills and Knowledge	Poor	AND	Personal Behavior	Medium	THEN	Personal Characteristics Factor	poor
IF	Skills and Knowledge	Poor	AND	Personal Behavior	Excellent	THEN	Personal Characteristics Factor	Medium
IF	Skills and Knowledge	Medium	AND	Personal Behavior	Poor	THEN	Personal Characteristics Factor	poor
IF	Skills and Knowledge	Medium	AND	Personal Behavior	Medium	THEN	Personal Characteristics Factor	Medium
IF	Skills and Knowledge	Medium	AND	Personal Behavior	Excellent	THEN	Personal Characteristics Factor	excellent
IF	Skills and Knowledge	Excellent	AND	Personal Behavior	Poor	THEN	Personal Characteristics Factor	poor
IF	Skills and Knowledge	Excellent	AND	Personal Behavior	Medium	THEN	Personal Characteristics Factor	excellent
IF	Skills and Knowledge	Excellent	AND	Personal Behavior	Excellent	THEN	Personal Characteristics Factor	excellent

Figura 5.14. Reglas finales para el tercer grupo de variables.

Del cuestionario también se pudo obtener la información necesaria para obtener los pesos de las variables de acuerdo con la metodología explicada en el capítulo anterior. En la Tabla 5.3, a modo de ejemplo, se muestra el número de expertos que consideraron cada una de las opciones dadas para el primer grupo de variables. El resto de las respuestas de los expertos se encuentran en el anexo F.

Tabla 5.3. Opinión de los expertos de la importancia de las variables del grupo 1.

Grupo 1	Contratación vs Formación	Contratación vs Comunicación e Informe	Formación vs Comunicación e Informe
Extremadamente menos importante	2	0	0
Menos importante	22	17	6
Igual importancia	11	14	13
Más importante	3	7	16
Extremadamente más importante	1	1	4

En esta sección se determina que variable es más importante comparada con las otras en su grupo correspondiente dependiendo de las respuestas de los expertos. Esto con el fin no sólo de determinar si la variable “Contratación” es más importante que la de “Comunicación e Informe”, sino también para cuantificar esta importancia relativa.

Además, la consistencia de las respuestas de los expertos ha sido evaluada, para asegurar que sólo las coherentes fueran consideradas en el sistema. Esto significa que, por ejemplo, un experto que haya respondido que la contratación es extremadamente más importante que la formación y extremadamente menos importante que la comunicación e informe, lógicamente su opinión entre la formación y la comunicación e informe debe ser que la primera es extremadamente menos importante que la segunda; si la respuesta del experto no es de esta manera, se descarta para los siguientes cálculos del peso y no es tomada en cuenta.

Para poder obtener los pesos de las variables, dos pasos principales fueron los necesarios:

1. Primero, las variables de cada uno de los cuatro grupos definidos fueron comprados por pares, según los resultados del cuestionario (Sección 5.3.4).
2. Después, para poder excluir las respuestas inconsistentes de los expertos, se usó una adaptación del modelo AHP y DVS (explicados en la sección 4.4.1), que se presenta a continuación.

Para seguir con la técnica de AHP, lo primero que se tiene que establecer es la escala de comparación que se usó. Para simplificar el problema se utilizó una escala de [1-5], como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Expresiones lingüísticas usadas y sus correspondientes valores numéricos.

Importancia	Definición
1	Extremadamente menos importante
3	Menos importante
5	Igual importancia
1/3	Más importante
1/5	Extremadamente más importante

Si se recopilan las respuestas de los expertos del cuestionario para la obtención de los pesos se puede construir la Tabla 5.5, en donde la respuesta mayoritaria para cada par de variables está representada por una X.

Tabla 5.5. Respuestas mayoritarias de los expertos en la obtención del peso.

	Extremadamente menos importante	Menos importante	Igual importancia	Más importante	Extremadamente mas importante	
Contratación		X				Formación
Contratación			X			Comunicación e Informe
Formación				X		Comunicación e Informe
Gestión de la carga de trabajo				X		Condiciones medioambientales
Gestión de la carga de trabajo				X		Equipamiento de seguridad
Condiciones medioambientales			X			Equipamiento de seguridad
Habilidades y conocimiento				X		Computamiento personal
Factor Organizacional				X		Factor de las características del trabajo
Factor Organizacional		X				Factor de las características personales
Factor de las características del trabajo		X				Factor de las características personales

Estos valores son los usados en la metodología AHP para determinar las matrices de comparación para cada grupo de variables del modelo. Por lo tanto, de acuerdo con la escala de comparación elegida y las respuestas de los expertos, las cuatro matrices de comparación para cada grupo de variables fueron las siguientes:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 5.15. Opciones elegidas por los expertos para la comparación de variables.

Posteriormente, todas las matrices fueron analizadas para determinar su consistencia. Esta medida de consistencia se llevó a cabo mediante el método DVS y usando la norma de Frobenius como se explicó en la sección 4.4.1.

Primero, se necesita determinar el índice de consistencia de las respuestas de los expertos. Considerando la escala de comparación elegida [1-5], los parámetros de desigualdad de Schweitzer son $M = 25$ y $m = 1$, y de acuerdo con la ecuación [4.17], el cuadrado de la norma Frobenius es representada por:

$$\|\tilde{A}\|_F^2 \leq \frac{26^2}{4 \times 25} n^2 \quad [5.6]$$

De donde:

$$\|\tilde{A}\|_F \leq \frac{26}{10} n \quad [5.7]$$

Finalmente, la medida de consistencia estará representada por:

$$MC = \frac{\|A - \tilde{A}\|_F}{\|A\|_F + \left(\frac{26}{10} n\right)} \quad [5.8]$$

Donde:

MC es la medida de consistencia.

$\left(\frac{26}{10} n\right)$ es el límite superior de la norma Frobenius para la matriz consistente \tilde{A} considerando la escala de comparación [1-5].

\tilde{A} es la matriz consistente.

Si $MC < 0,1$ la decisión del experto es aceptada y puede decirse que \tilde{A} es una matriz consistente

Esta aproximación fue usada para cada grupo de respuestas de los expertos. Las respuestas consistentes fueron elegidas para calcular la matriz final para poder obtener los

pesos de las variables, el resto de las respuestas fueron descartadas. Esta operación fue realizada en Matlab con el siguiente código mostrado en la Figura 5.16; poco más de la mitad de las 39 respuestas de los expertos fueron consideradas consistentes.

```
function [w, IM, CM] = Proba_1(A)
[U, S, V]=svd(A);
LSV=S(1,1);
u=U(:,1);
v=V(:,1);

Denom=zeros(1,1);
for i=1:size(A,1)
    Denom=Denom+(u(i,1)+1/v(i,1));
end

for i=1:size(A,1)
    w(i,1)=(u(i,1)+1/v(i,1))/Denom;
end

for i=1:size(A,1)
    for j=1:size(A,1)
        A_consist(i,j)=w(i,1)/w(j,1);
    end
end

IM=norm(A-A_consist,'fro')
Scale_range=norm(A,'fro')+(26/10)*size(A,1);
CM=IM/Scale_range
```

Figura 5.16. Función de Matlab para la consistencia y el cálculo de los pesos.

La Tabla 5.6 muestra el número de respuestas consistentes dadas por los expertos para los pares de variables del primer grupo. El número marcado en rojo representa la opción mayoritaria y, por lo tanto, la opción usada para obtener la matriz final empleada para el cálculo de los pesos. Los resultados de las respuestas consistentes de los demás pares de variables de los otros grupos se encuentran en el anexo G.

Tabla 5.6 Respuestas consistentes de los expertos para el grupo 1 de variables.

Grupo 1	Contratación vs Formación	Contratación vs Comunicación e Informe	Formación vs Comunicación e Informe
Extremadamente menos importante	2	0	0
Menos importante	13	9	3
Igual importancia	9	11	10
Más importante	2	5	11
Extremadamente más importante	0	1	2

Tomando en cuenta sólo las respuestas consistentes, cuatro matrices finales fueron construidas.

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 5.17. Matrices finales de las respuestas consistentes.

En estas matrices finales de comparación, a excepción de A_1 , todos los elementos que las componen son iguales a uno. Esto significa que de acuerdo con la opinión de los expertos, las variables de cada uno de los grupos (A_2 , A_3 y A_4) tienen la misma importancia.

Por el contrario, en la matriz A_1 existen varios elementos que no son iguales a uno. Considerando, por ejemplo, la primera fila, el valor $1/3$ representa la importancia relativa entre la Contratación y la Formación. Esto significa, que de acuerdo con la mayoría de los expertos, la contratación tendría menos importancia que la formación.

En la Tabla 5.7 se muestran los pesos finales de las variables, se puede observar que solamente en el primer grupo de variables existe una diferencia significativa, siendo la variable formación más importante (0,6) comparada con las variables contratación y comunicación e informe (ambas con 0,2).

Tabla 5.7. Pesos finales de las variables.

Grupo 1	Contratación	0,2
	Formación	0,6
	Comunicación e Informe	0,2
Grupo 2	Gestión de la carga de trabajo	0,333
	Condiciones Medioambientales	0,333
	Equipamiento de Seguridad	0,333
Grupo 3	Habilidades y Conocimiento	0,5
	Comportamiento Personal	0,5
Grupo 4	Factor organizacional	0,333
	Factor características del trabajo	0,333
	Factor características personales	0,333

Una vez obtenidos todos los datos necesarios de los expertos y de acuerdo con el esquema de la Figura 5.2, el siguiente paso es el del proceso de inferencia difusa, que se presenta a continuación.

5.4 Proceso de inferencia difusa

Como se comentó en el capítulo IV, existen dos métodos para llevar a cabo éste proceso, uno basado en funciones lineales (Modelo de Sugeno) y el elegido en éste trabajo, basado en reglas difusas (Modelo Mamdani). Gracias a la opinión de los expertos, se tuvo toda la información de las reglas, por lo tanto, siguiendo la metodología, una vez terminado el proceso de fusificación, los valores ya fusificados fueron convertidos a reglas difusas y evaluadas para obtener un valor difuso.

5.4.1 Reglas difusas

Como ya se ha explicado en el capítulo IV sección 4.4.2, cuando es necesario enfrentarse con más de una variable de entrada, la parte del antecedente de la regla difusa es construida mediante operadores difusos. En este estudio se decidió usar el método del “producto” de los operadores “Y”, tal y como se observa en la construcción de las reglas del cuestionario. En la Figura 5.17 se puede observar la selección de este método para este tipo de operador en el software usado.

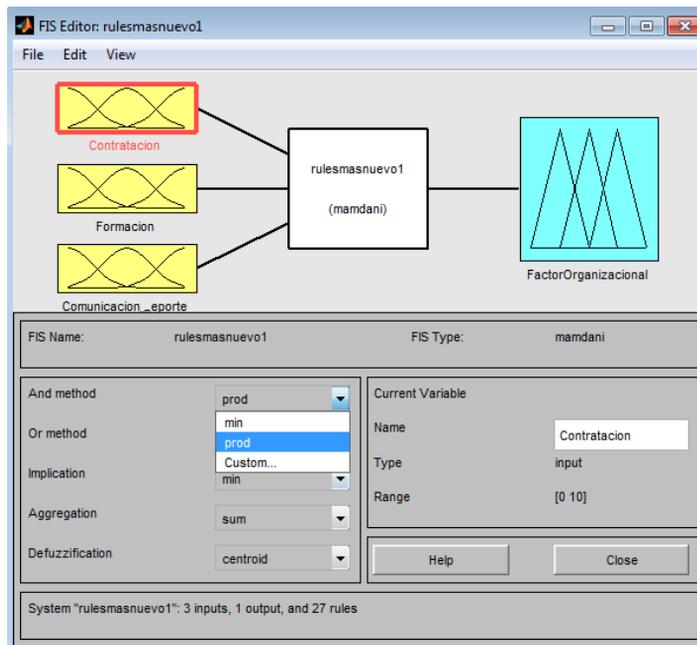


Figura 5.18. Elección de método mediante los operadores difusos.

Establecidas las 90 reglas difusas, fue posible introducirlas en el editor de reglas contenido en el “*Fuzzy Toolbox*” del software Matlab. Los valores para los consecuentes de las 90 reglas provienen de los resultados del cuestionario respondido por los 39 expertos. En la Figura 5.18 se muestra el editor de reglas del grupo 3 de variables, en donde se introdujeron las 9 reglas difusas correspondientes al factor de las características personales. De la misma manera, se introdujeron las 81 reglas restantes de los demás grupos de variables.

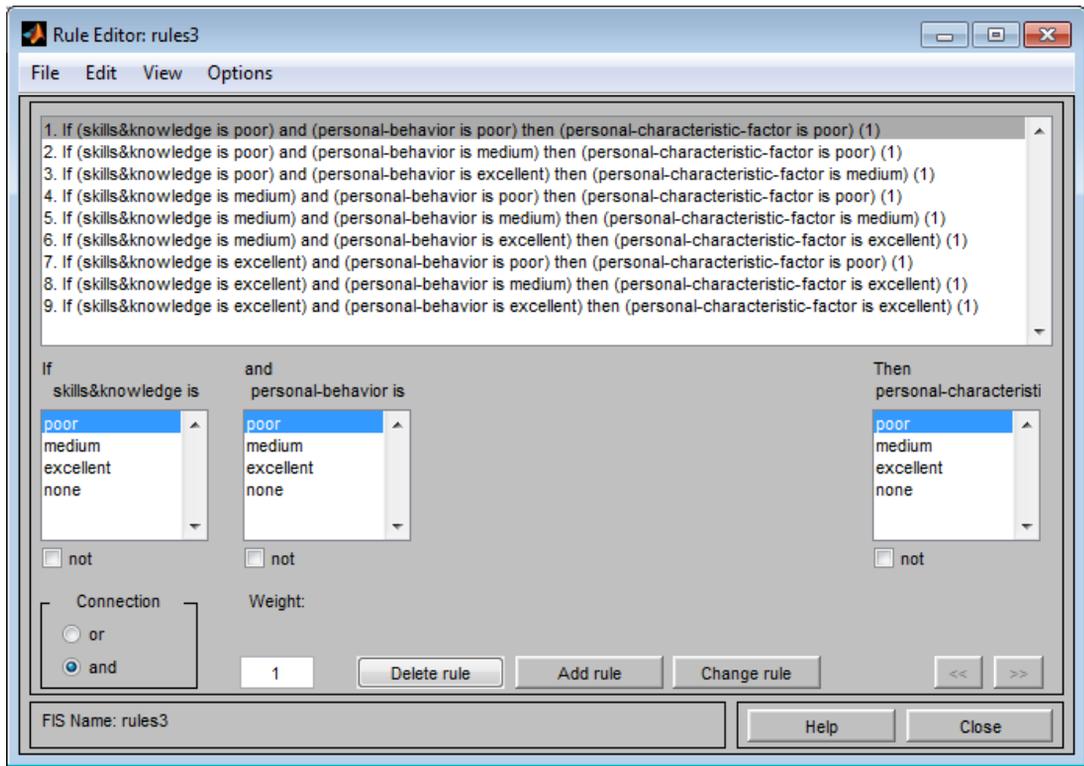


Figura 5.19. Editor de reglas del grupo 3 de variables.

Además de las reglas difusas, por medio de la información brindada por los expertos se pudo determinar los pesos de las variables que tienen que ser introducidos al sistema.

5.4.2 Introducción de los pesos de las variables

Para poder introducir los pesos de las variables previamente obtenidos a partir del cuestionario de los expertos, se tiene que usar otro tipo de operador. Para realizar esto, se creó una nueva opción llamada *AHP_weights3* en la lista de métodos "And", tal como se muestra en la Figura 5.19.

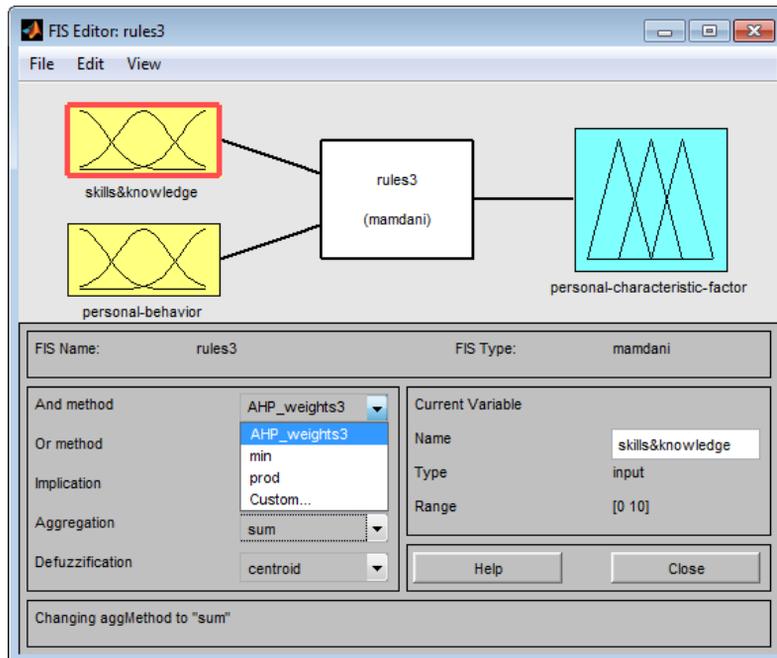


Figura 5.20. Operador para incluir los pesos del grupo 3 de variables.

Esta función introducida en el software correspondiente fue creada con el siguiente código que se muestra en la Figura 5.20.

```
function y = AHP3_and(x)
w_var=[0.5 0.5];

if min(x)==0
    y=0;
else y=w_var*x;
end
```

Figura 5.21. Función de Matlab usada para insertar los pesos en el grupo 3.

De esta misma manera se introdujeron las funciones correspondientes para los otros grupos de variables. De acuerdo con la Figura 5.2, el siguiente paso dentro del proceso de inferencia difusa es el proceso de implicación.

5.4.3 Implicación

Este proceso representa la implicación entre el antecedente y el consecuente. Como se mencionó en la sección 4.4.3, existen diferentes tipos de métodos de implicación, el utilizado en este estudio es el del “mínimo”, el cual trunca el valor de salida de la función de pertenencia de cada regla. Se utilizó este método y no el del “producto”, porque se vió en la bibliografía que era el método más usado (Ocampo et al., 2006).

5.4.4 Agregación

Con respecto a la elección del método de agregación de entre sus diferentes opciones (ver sección 4.4.4), se eligió el método de “agregación por sumatorios”. Esta elección fue debida a que, después de varios intentos con los dos tipos de agregación existentes, éste era el que daba mejores resultados para el análisis de sensibilidad del modelo que será explicado más adelante. De acuerdo con la Figura 5.2, la agregación es el último paso del proceso de inferencia difusa.

En la Figura 5.21 se puede observar cómo se introdujeron los métodos de implicación y agregación en el software Matlab. También se puede observar la opción disponible para elegir el método de defusificación, el cual es el último paso de la metodología de la lógica difusa y se comenta a continuación.

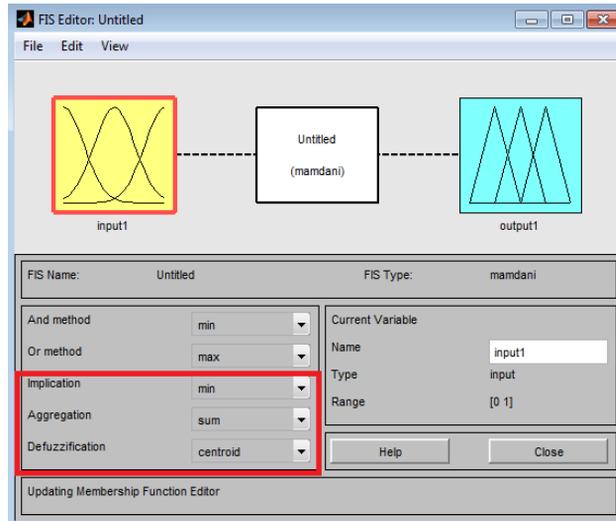


Figura 5.22. Implicación, agregación y defusificación.

5.5 Defusificación

El método escogido para el proceso de defusificación es el método del centroide. Éste, comparado con los otros métodos de defusificación, representa una manera más gradual de obtener los valores numéricos, además de ser el método más usado.

El valor numérico obtenido después de este proceso de defusificación será el valor del modificador difuso de la frecuencia (m_{fh}). Este valor, según lo establecido en la sección 5.1, será un valor de entre 1,0 y 1,5, que multiplicará a una frecuencia inicial obtenida de las bases de datos de frecuencias genéricas de accidentes para obtener una frecuencia final en donde el factor humano este incluido.

5.6 Análisis de sensibilidad del modelo

En esta sección se presenta el análisis de sensibilidad del modelo con el fin de determinar cuáles son las variables del sistema que tienen más impacto en el modificador difuso de la frecuencia. El método usado para determinar la influencia relativa está basado en el índice de sensibilidad (SI) (Ferraro, 2009; Lenhart et al., 2002). Este índice es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$I_S = \frac{\frac{|y_2 - y_1|}{y_0}}{\frac{2\Delta x}{x_0}} \cdot 100 \quad [5.9]$$

Donde:

- y_0 : valor de la variable dependiente y usada como valor inicial x_0 .
- y_1 : valor de la variable dependiente y usada como valor inicial x_1 .
- y_2 : valor de la variable dependiente y usada como valor inicial x_2
- x_0 : valor de la variable independiente (variable sobre la cual es analizada).
- $x_1 = x_0 - \Delta x$; disminución de Δx de la variable independiente x_0 .
- $x_2 = x_0 + \Delta x$; incremento de Δx de la variable independiente x_0 .
- Δx : 25% de x_0 .

La sensibilidad de una variable independiente sobre una dependiente se clasificada como se presenta en la siguiente tabla 5.8.

Tabla 5.8. Grados de sensibilidad (Ferraro, 2009)

Factor I_S	Modificador difuso I_S	Sensibilidad
$0 = I_S < 5$	$0 = I_S < 0,25$	Bajo
$5 = I_S < 20$	$0,25 = I_S < 1$	Moderado
$20 = I_S < 60$	$1 = I_S < 3$	Alto
$60 = I_S < 100$	$3 = I_S < 5$	Muy alto

Para realizar éste análisis, se decidió comenzar por tres combinaciones diferentes de conjuntos difusos. De esta manera, se pudo observar cuanto y de qué manera el valor del modificador difuso se ve afectado cuando sus variables son alteradas. Este estudio se realizó para el caso en que los pesos de las variables fueron tomados en cuenta y en caso de que no.

Para simplificar el estudio, fueron fijados valores numéricos para cada uno de los conjuntos difusos. Estos valores fueron introducidos al “*fuzzy toolbox*” del “*Matlab*” como los valores de entrada: Pobres (2.5), Medias (5) y Excelentes (8.5). Después, para cada

situación establecida, fueron obtenidos los valores de los factores y del modificador difuso. Las combinaciones de conjuntos difusos así como los valores numéricos introducidos para las tres situaciones propuestas se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Valores de los factores y del modificador para las tres situaciones

	Situación 1		Situación 2		Situación 3	
Contratación	Pobres	2,5	Excelentes	8,5	Medias	5
Formación	Medias	5	Excelentes	8,5	Pobres	2,5
Comunicación e Informe	Pobres	2,5	Medias	5	Medias	5
Factor Organizacional	3,34		8,52		3,13	
Factor Organizacional con pesos	2,36		8,42		2,19	
Gestión de la carga de trabajo	Medias	5	Excelentes	8,5	Pobres	2,5
Condiciones medio ambientales	Medias	5	Pobres	2,5	Pobres	2,5
Equipamiento de seguridad	Pobres	2,5	Medias	5	Medias	5
Factor de las Características del Trabajo	3,93		4,87		3,3	
Habilidades y Conocimiento	Pobres	2,5	Medias	5	Pobres	2,5
Comportamiento personal	Medias	5	Excelentes	8,5	Pobres	2,5
Factor de las Características Personales	2,4		8,76		1,9	
Modificador difuso de la frecuencia	1,33		1,16		1,36	
Modificador difuso de la frecuencia con pesos	1,35		1,17		1,38	

La sensibilidad de cada variable fue estudiada individualmente para cada grupo de variables (figura 5.2). Esto significa que, para evaluar la sensibilidad de una variable, por ejemplo la variable subcontratación, se midió su afectación en su factor correspondiente, en este caso el factor organizacional; mientras que los otros dos factores se mantuvieron constantes. No se realizaron variaciones simultáneas de las variables debido al gran número de posibilidades de escenarios que se podrían producir.

Una vez establecidas las condiciones de entrada de las situaciones planteadas. Se eligió el rango en el cual las variables fueron probadas (1-10). Para simplificar el estudio, se

eligieron 5 valores: 2, 3,5, 5, 6,5 y 8. Finalmente, se calcula el promedio de los valores para determinar el índice de sensibilidad de cada variable y factor del modelo.

En la siguiente tabla 5.10 se presentan los cálculos obtenidos para obtener el índice de sensibilidad para el segundo grupo de variables para la situación 1. El resto de los cálculos para el resto de los grupos de variables (1, 3 y 4), así como las situaciones 2 y 3, se encuentran en el anexo H.

Tabla 5.10. Índice de sensibilidad de la situación 1 para el segundo grupo de variables

Datos segundo grupo	Variable independiente				Índice de sensibilidad			
	x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_S
x= gestión carga trabajo y= Factor características del trabajo	2.00	0,5	1,5	2,5	2,91	2,52	3,3	56,6
Condiciones M. ambientales = 5	3,5	0,88	2,63	4,38	3,77	3,38	3,89	27,05
Equipamiento de seguridad = 2.5	5.00	1,25	3,75	6,25	3,93	3,82	4,13	15,77
	6,5	1,63	4,88	8,13	4,2	3,92	4,79	41,42
	8.00	2.00	6.00	10.00	4,76	4,06	4,99	39,07
Media								35,39
x= Condiciones M. ambientales y= Factor características del trabajo	2.00	0,5	1,5	2,5	2,91	2,52	3,3	53,6
Gestión de carga de trabajo = 5	3,5	0,88	2,63	4,38	3,77	3,38	3,89	27,05
Equipamiento de seguridad = 2.5	5.00	1,25	3,75	6,25	3,93	3,82	4,13	15,77
	6,5	1,63	4,88	8,13	4,2	3,92	4,79	41,42
	8.00	2.00	6.00	10.00	4,76	4,06	4,99	39,07
Media								35,39
x= Equipamiento de seguridad y= Factor características del trabajo	2.00	0,5	1,5	2,5	3,4	2,86	3,93	62,94
Gestión carga de trabajo = 5	3,5	0,88	2,63	4,38	4,62	3,38	4,84	63,2
Condiciones M. ambientales = 5	5.00	1,25	3,75	6,25	4,9	3,82	4,95	46,12
	6,5	1,63	4,88	8,13	4,96	3,92	5,02	44,35
	8.00	2.00	6.00	10.00	5,02	4,06	5,07	40,23
Media								51,37

5.6.1. Resultados y conclusiones del análisis de sensibilidad

Una vez determinada la media de las variables para cada situación, se calculó un promedio global para cada variable y se asignó un grado de sensibilidad de acuerdo la tabla 5.8. En la siguiente tabla 5.11 se muestra el promedio global y la clase de sensibilidad para

cada variable de los primeros tres grupos. En la figura 5.22, se muestra el gráfico con ésta información.

Tabla 5.11. Índice de sensibilidad final para las variables de los primeros tres grupos

Variable	Índice de sensibilidad medio			Promedio global	Sensibilidad
	Situación 1	Situación 2	Situación 3		
Subcontratación	68,98	42,6	69,02	60,2	Muy alta
Subcontratación con pesos	11,42	13	14,03	12,82	Moderada
Formación	65,3	42,6	44,49	50,8	Alta
Formación con pesos	20,11	13,32	19,8	17,74	Moderada
Comunicación e Informe	36,55	22,22	71,74	43,5	Alta
Comunicación e Informe pesos	19,47	7,82	22,3	16,53	Moderada
Gestión de la carga de trabajo	35,39	35,36	35,39	35,38	Alta
Condiciones medio ambientales	35,39	26,26	35,39	32,35	Alta
Equipamiento de seguridad	51,37	19,31	47,26	39,31	Alta
Habilidades y Conocimiento	99,04	19,74	25,29	48,02	Alta
Comportamiento personal	81,48	99,04	81,48	87,33	Muy alta

Sensibilidad de las variables

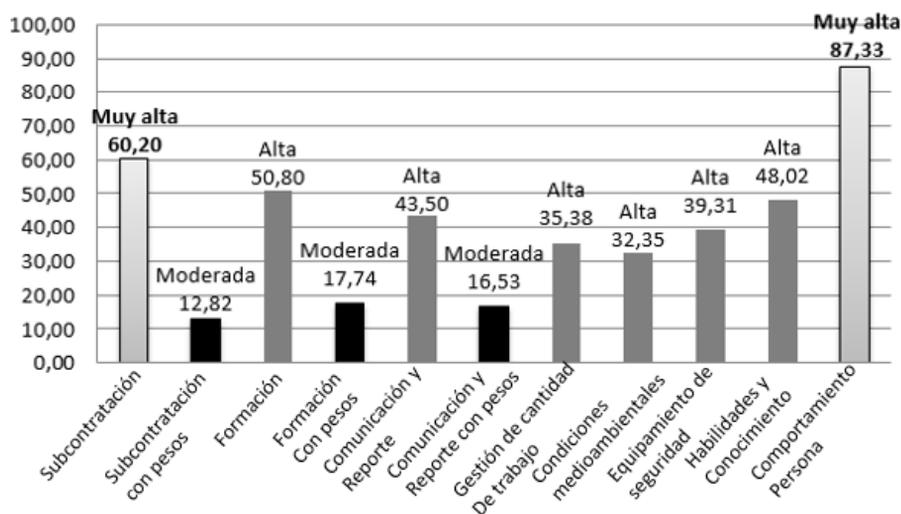


Figura 5.23. Grado de sensibilidad de las variables de los primeros tres grupos

De la misma manera se obtuvieron los promedios globales para los factores del grupo 4 de variables (Tabla 5.12), así como su representación gráfica (5.23).

Tabla 5.12. Índices de sensibilidad final de los factores del cuarto grupo

Variable	Índice de sensibilidad medio			Promedio global	Sensibilidad
	Situación 1	Situación 2	Situación 3		
Factor Organizacional	2,7	8,75	2,36	4,6	Muy alta
Factor de las características del trabajo	1,76	4,87	1,45	2,69	Moderada
Factor de las características personales	2,08	8,38	2,07	4,17	Muy alta

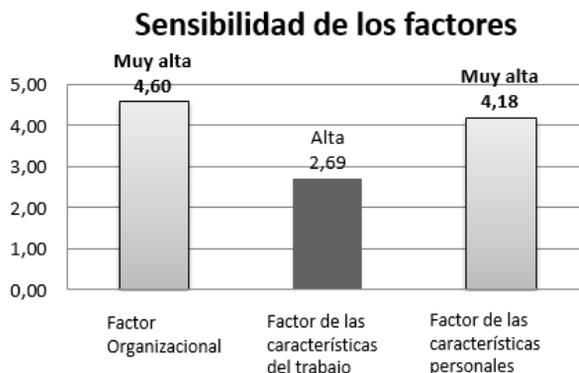


Figura 5.24. Sensibilidad de los factores del cuarto grupo

Como conclusión del análisis de sensibilidad realizado al modelo se puede afirmar lo siguiente:

- Las variables del factor organizacional, cuando no se toman en cuenta los pesos, resultaron ser menos sensibles, pasando de sensibilidad “alta” a “moderada”. Como en este caso las variables ya llevan incluido su peso, su sensibilidad parece menor.
- Las variables del modelo que resultaron ser más sensibles fueron la subcontratación y el comportamiento personal del trabajador, obteniendo una sensibilidad muy alta.
- Finalmente, la sensibilidad asociada al grupo de los factores en general fue alta. Para el factor de las características del trabajo y para los factores organizaciones y de las

características personales muy alta. Esto se debe a que los dos últimos factores incluyen variables con alta sensibilidad (la mayor de todas las variables).

En el siguiente capítulo se explica la segunda metodología que se usó para la creación de un modificador de la frecuencia.

Capítulo VI. Simulación de Monte Carlo y metodología

En este capítulo se introduce la técnica de la “Simulación de Montecarlo” que es una herramienta que sirve para la identificación de la incertidumbre mediante el uso de variables aleatorias. Inicialmente, se hace referencia a la historia de esta metodología, específicamente en el ámbito del análisis del riesgo.

Posteriormente, se explican los principales conceptos relacionados con esta herramienta para poder aplicarla a cualquier situación real. Finalmente, se propone una metodología basada en la simulación de Monte Carlo para la creación de un modificador de la frecuencia que permita incluir el efecto del factor humano.

6.1 Introducción

La herramienta de Monte Carlo se aplica en el campo de las simulaciones, es por esto que es llamada “simulación de Monte Carlo”. La simulación es una técnica cuantitativa utilizada para obtener la respuesta más probable de un evento por medio de la simulación de un modelo matemático. Una simulación se puede definir como “el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema (Coss, 1999)”.

La simulación de Monte Carlo utiliza funciones de distribución con el propósito de realizar una experimentación cuyos resultados lleguen, después de un número conveniente de ensayos (iteraciones), a simular lo que pasaría en un sistema real. Esta herramienta combina conceptos estadísticos con la capacidad de programas computacionales capaces de generar números aleatorios y automatizar cálculos.

El método fue llamado de esta manera por el principado de Mónaco “la capital del juego de azar”, al tomar una ruleta de juego como un generador simple de número aleatorios. Este nombre es relativamente reciente y fue atribuido a Jon von Neumann y Stanislaw Ulam cuando trabajaban en el proyecto Manhattan durante la segunda guerra mundial.

Sin embargo, la idea del cálculo de Monte Carlo es mucho más antigua que la aparición de los ordenadores y era conocida anteriormente por el nombre de "muestreo estadístico". Inicialmente, Monte Carlo no fue un método para resolver problemas en física, sino para evaluar integrales que no podían ser evaluadas de otra manera: el cálculo de integrales de funciones complicadas y las integrales en espacios multidimensionales fueron las dos áreas iniciales en las que la simulación de Monte Carlo probó ser de gran utilidad.

Hoy en día son muchas las aplicaciones que tiene esta herramienta en diferentes campos como en la física, química, problemas ingenieriles, economía etc. Esto es debido al avance continuo de la capacidad de las computadoras. El uso de datos simulados que utiliza ésta

técnica, ha experimentado un gran desarrollo, constituyendo en la actualidad una importante herramienta para el desarrollo de teorías y métodos matemáticos.

Smid et al. (2009) mencionaron los beneficios y fortalezas de utilizar esta herramienta, como su capacidad de modelar sistemas complejos y de poder trabajar con cualquier tipo de distribución de probabilidad. También mencionaron que es una herramienta intuitiva, relativamente fácil de implementar y con tiempo de obtención de resultados cortos; además, de ser ampliamente aceptada y usada. Sin embargo, también establecieron algunas deficiencias como el hecho de que es una técnica de aproximación y que es unidireccional.

6.2 La simulación de Monte Carlo en el análisis de riesgo

Como se ha mencionado, la simulación de Monte Carlo es una herramienta utilizada en muchos ámbitos. Dentro del ámbito del análisis de riesgo, Rezaie et al. (2007) propusieron un algoritmo basado en la simulación de Monte Carlo para investigar los efectos de la incertidumbre en este ámbito. También se publicó un análisis de las ventajas de usar esta herramienta en los análisis de riesgo microbacteriales (Smid et al., 2009).

Ésta herramienta ha sido ampliamente utilizada como un método de identificación de incertidumbre, y también se ha combinado con la lógica difusa. Li et al. (2008) hicieron un análisis de riesgo de un sistema energético usando un método híbrido de conjuntos difusos y simulación de Monte Carlo.

Esta herramienta también ha sido usada por Changpeng et al. (2014) para tratar los factores humanos y ver los efectos de dichos factores en las ejecuciones de vuelos en el campo de la aeronáutica asignándoles una función de densidad de la probabilidad (FDP).

Es por esto, que usando esta herramienta se puede introducir el efecto del factor humano. Para poder entender el funcionamiento de esta herramienta y la manera en que han sido introducidos los diferentes factores, a continuación se explican los fundamentos de ésta.

6.3 Fundamentos de la simulación de Monte Carlo

Yauri (2012) estableció que para implementar la simulación de Monte Carlo en su estado puro, la cual está fundamentada en la generación de números aleatorios, se deben seguir los siguientes pasos:

- Determinar las variables aleatorias y sus distribuciones.
- Iterar tantas veces como sean necesarias:
 - Generar un número aleatorio.
 - Uniforme [0,1].
 - Determinar el valor para el número aleatorio generado de acuerdo al rango o clases que se especifiquen.
- Calcular media, desviación estándar o métodos estadísticos comparables.
- Analizar los resultados.

Otra opción para trabajar con Monte Carlo sería cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o bien cuando se tienen relaciones entre las variables. Entonces los pasos generales que se deben seguir son los siguientes:

- Diseñar el modelo lógico de decisión.
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
- Incluir posibles dependencias entre variables.
- Calcular el resultado del modelo según valores de muestreo (iteración) y registrar el resultado.
- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa.
- Calcular media o desviación estándar.
- Analizar los resultados.

Teniendo en cuenta estas dos aproximaciones, se puede decir que existen tres conceptos básicos que se deben de considerar en el momento de aplicar la simulación de Monte Carlo: las variables aleatorias, las funciones de densidad de probabilidad (FDP) y la manera de interpretar estos resultados mediante el uso de iteraciones. A continuación se explican estos conceptos.

6.3.1 Variables aleatorias

Se denomina una variable aleatoria, a una variable X que puede tomar un conjunto de valores $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$ con probabilidades $\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_{n-1}\}$. El problema crucial de la aplicación del método de Monte Carlo es hallar los valores de una variable aleatoria con una distribución de probabilidad dada por la función $P(s)$ a partir de los valores de una variable aleatoria uniformemente distribuida en el intervalo $[0, 1)$, proporcionada generalmente por algún generador de números aleatorios. Existen diferentes tipos de variables aleatorias, a continuación se explican las más comunes:

- Discretas: una variable aleatoria representada mediante una distribución discreta de probabilidad puede tomar un valor de entre un conjunto de valores, cada uno de los cuales tiene asignada una determinada probabilidad de ocurrencia.
- Continuas: una variable aleatoria representada mediante una distribución continua de probabilidad puede tomar cualquier valor dentro de un rango determinado.
- Paramétricas: la distribución de probabilidad se ajusta a la descripción matemática de un proceso aleatorio que cumple con determinados supuestos teóricos. Los parámetros que definen la distribución en general no guardan relación intuitiva con la forma de la distribución.

Por lo tanto, para simular un proceso o hallar la solución de un problema matemático usando esta metodología es necesario usar gran cantidad de estos números o variables aleatorias, ya que este método consiste en tomar un solución válida, provocar una pequeña variación aleatoria, y si la nueva configuración cumple con las restricciones, se registra esa nueva solución; si no, se queda con la antigua.

Vanorio y Mera (2012) afirmaron que las variables aleatorias e inciertas de un modelo se representan usando rangos de posibles valores denominados distribuciones de probabilidad, mediante el uso de estas distribuciones las variables pueden tener diferentes probabilidades

de producir diferentes resultados. Por lo tanto, estas variables están representadas por distribuciones de probabilidad, las cuales son necesarias para después poder hacer las iteraciones.

6.3.2 Funciones de distribuciones de probabilidad (FDP)

Toda variable aleatoria posee una distribución de probabilidad que describe su comportamiento. Si la variable es discreta, es decir, si toma valores aislados dentro de un intervalo, su distribución de probabilidad especifica todos los valores posibles de la variable junto con su probabilidad de ocurrencia. Si la variable es continua, es decir, cuando la variable puede tomar cualquier valor de un intervalo, la distribución de probabilidad permite determinar las probabilidades correspondientes a subintervalos de valores. En la siguiente tabla se muestran algunas de las FDP más comunes.

Tabla 6.1. Clasificación de funciones de distribuciones de probabilidad.

Distribución	Descripción	Usos
Normal	Da un valor con media	Análisis de valores de resultados de prueba
Triangular	Da un valor con parámetros optimista, normal y pesimista	Cuando no se conoce la forma de distribución pero se pueden estimar los escenarios
Uniforme	Da un valor con parámetros mínimo y máximo	Cuando dentro de un rango conocido todos los valores tienen la posibilidad de ocurrir
Poisson	Da un valor con una media	Describir comportamientos que ocurrieron en un periodo de tiempo dado

Un ejemplo de la distribución normal se presenta en la Figura 6.1.

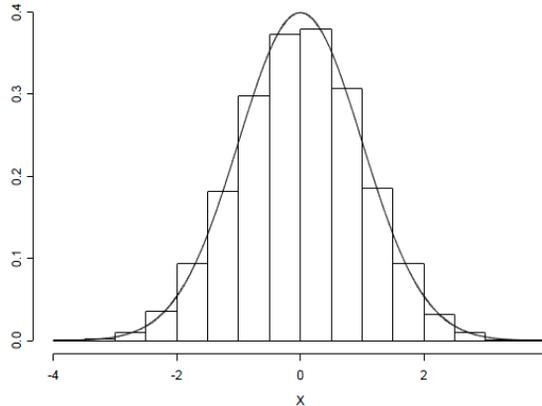


Figura 6.1. Variables aleatorias mediante una distribución normal (Olivares, 2007).

En el análisis de riesgo, muchas veces las distribuciones de ciertas variables o parámetros no son conocidas, por lo que, generalmente, se representan con las más generales como son las normales, triangulares o uniformes.

Vanorio y Mera (2009) afirmaron que para la evaluación de riesgos, específicamente en el sector de transportes, las siguientes funciones de probabilidad son las que mejor se adaptan: distribución uniforme, triangular, normal y gamma. Amsterdam (2004) utilizó la simulación de Monte Carlo para el cálculo de consecuencias en el análisis de riesgo y asignó diferentes tipos de FDP a variables como: “normal” a la temperatura de la sustancia, “triangular” a la rugosidad del terreno y a las variables donde encontró más dificultad para calcularlas y con más incertidumbre usó distribuciones uniformes.

Después de establecer las variables aleatorias y sus PDF, se tienen que realizar las iteraciones para obtener diferentes posibles valores finales.

6.3.3 Interpretación de resultados

La simulación de Monte Carlo se basa también en las iteraciones del modelo propuesto. Cuantas más iteraciones se hagan, más preciso será. Sin embargo, el esfuerzo computacional también será mayor. El número de iteraciones dependerá de la complejidad del modelo propuesto.

Smid et al. (2009) mencionaron que, al final las iteraciones, se utilizan, para extraer información de los resultados, medias, desviaciones estándares o percentiles que pueden ser de gran ayuda para los asesores del riesgo.

Amsterdam (2004) utilizó el valor medio después de 50 iteraciones para establecer la concentración de cloro en una dispersión tóxica, dándole rangos a variables como la temperatura del cloro y la cantidad liberada. También utilizó como variable la cantidad de masa liberada, haciendo diferentes iteraciones entre un rango de cantidad de masa para obtener la distancia de exposición causante de quemaduras de segundo grado en el caso de una explosión de un tanque de propano.

El resultado obtenido después de todas las iteraciones e interpretadas por métodos estadísticos puede tener diferentes significados dependiendo del objetivo y de lo que se esté buscando. A continuación, se presenta la metodología basada en la herramienta de la simulación de Monte Carlo para obtener el modificador de la frecuencia.

6.4 Metodología

Se ha utilizado el mismo concepto explicado en la sección 5.1 de incluir el factor humano al cálculo de las frecuencias de los accidentes mediante la creación de un modificador.

El modificador basado en la simulación de Monte Carlo tiene las mismas características que se han explicado en el capítulo anterior para el modificador difuso.

- El modificador tendrá un valor entre 1 y 1,5.
- El modificador (m_m) multiplica a un valor de frecuencia genérica a partir de las bases de datos.

Zapata (2003) comentó que no existe una metodología única para implementar la simulación de Montecarlo, ya que es una herramienta que puede servir en muchos campos y

es adaptable al tipo de situación que se esté aplicando. Para poder integrar el factor humano y poder crear el modificador se propone la siguiente metodología (Figura 6.1).

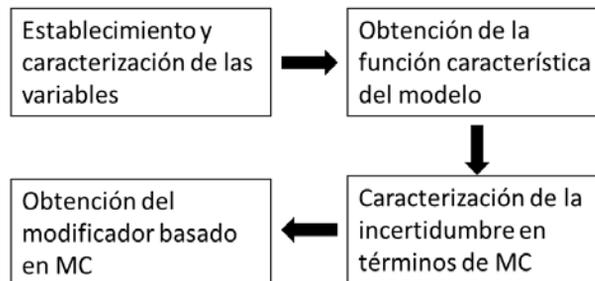


Figura 6.2. Metodología para la obtención del modificador mediante MC.

A continuación, se explican los pasos necesarios para la obtención del modificador basado en la simulación de Monte Carlo de acuerdo con la metodología propuesta en la Figura 6.2.

6.4.1 Establecimiento y caracterización de las variables

Las variables han sido definidas de acuerdo con el modelo establecido en la sección 5.2. Por lo tanto, se tienen en cuenta los mismos grupos de variables que contienen los factores establecidos: factor organizacional, factores de las características del trabajo, factor de las características personales. De esta manera se podrán comparar los resultados de las dos metodologías propuestas: lógica difusa y simulación de Monte Carlo.

Cada una de las variables, las cuales tienen en cuenta el factor humano, es tratada como variable aleatoria continua, ya que éstas pueden tomar cualquier valor dentro de un rango determinado que será un rango de incertidumbre acorde con las condiciones de los factores considerados. Como ya se ha mencionado, estas variables están representadas por una FDP que puede ser de diferentes formas. El tipo de FDP seleccionado para representar a las variables es del tipo “Uniforme”, debido a las características cualitativas del factor humano y la complejidad para su representación.

El siguiente paso según la metodología propuesta es la obtención de una función característica del modelo la cual es explicada a continuación.

6.4.2 Obtención de la función característica del modelo

Para obtener la función característica del modelo se tienen que tener en cuenta varias consideraciones, algunas de las cuales ya han sido mencionadas, como: las conexiones entre las variables, la restricción del valor final del modificador (1,50) o los diferentes pesos de las variables. Todas estas consideraciones están contenidas en la Figura 6.3.

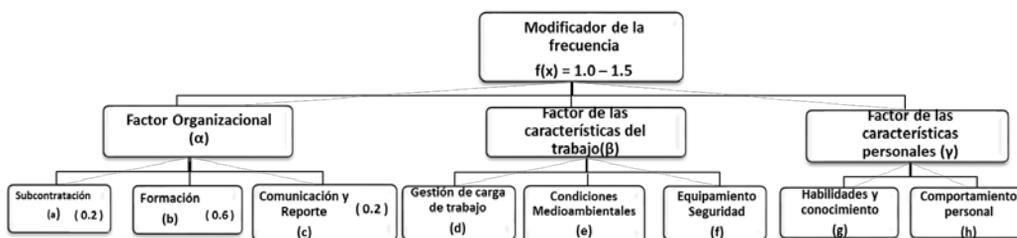


Figura 6.3. Representación del modelo con las restricciones.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se obtuvieron las siguientes ecuaciones para representar a los factores:

$$\text{Factor Organizacional: } \alpha = (0.2)(a) + (0.6)(b) + (0.2)(c) \tag{6.1}$$

$$\text{Factor de las características del trabajo: } \beta = \frac{d+e+f}{3} \tag{6.2}$$

$$\text{Factor de las características personales } \gamma = \frac{g+h}{2} \tag{6.3}$$

Donde:

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| a = subcontratación | e = condiciones medioambientales |
| b = formación | f = equipamiento de seguridad |
| c = comunicación e informe | g = habilidades y conocimiento |
| d = gestión de la carga de trabajo | h = comportamiento persona |

Una vez obtenidas las tres ecuaciones individuales de los factores, se suman ($\gamma + \beta + \alpha$) y se obtiene la ecuación [6.4].

$$x = \alpha + \beta + \gamma = (0.2 \cdot a + 0.6 \cdot b + 0.2 \cdot c) + \left(\frac{d+e+f}{3}\right) + \left(\frac{g+h}{2}\right) \quad [6.4]$$

Como el valor máximo de cada factor individual es 10, entonces:

$$x \in [0,30] \quad [6.5]$$

Si el modificador de la frecuencia está representado por $f(x)$, entonces $[F(x)]_{m\acute{a}x}$ se obtiene cuando $(x)_{m\acute{i}n}$. Por otro lado, cuando $(x)_{m\acute{a}x}$ entonces $[F(x)]_{m\acute{i}n}$. Con esta informaci3n se determinan dos puntos de una lnea recta. Despu3s de considerar esto, y usando una regresi3n lineal, se llega a la siguiente ecuaci3n:

$$F(x) = -0,0167 \cdot x + 1,5 \quad [6.6]$$

Para poder trabajar con esta ecuaci3n se tiene que caracterizar la incertidumbre en t3rminos de la simulaci3n de Monte Carlo, esto quiere decir que a cada variable de entrada "a" o "h" (Figura 6.3) se le tiene que asignar un rango de incertidumbre para poder hacer las iteraciones necesarias que necesita el modelo.

6.4.3 Caracterizaci3n de la incertidumbre en t3rminos de la simulaci3n de Monte Carlo

Como ya se ha mencionado, la simulaci3n de Monte Carlo es un proceso iterativo que se basa en la generaci3n de n3meros aleatorios; por lo tanto, se tienen que realizar N n3mero de iteraciones para poder obtener un resultado final. Estas iteraciones se han realizado en un rango de incertidumbre asignado. Dicho rango proviene de las caracteristicas de cada empresa. Para poder obtenerlo, se ha creado un m3todo de evaluaci3n del comportamiento de las empresas, a partir del cual se han determinado los rangos de incertidumbre necesarios para poder continuar con la metodolog3a propuesta. Este m3todo de evaluaci3n del comportamiento de las empresas es ampliamente explicado en el siguiente capitulo.

6.4.3.1 Obtención del rango de incertidumbre

De acuerdo con el resultado obtenido del método de evaluación del comportamiento de las empresas, se conocerán los valores de las variables y se podrán comparar con los rangos establecidos en la Tabla 6.2. De esta manera, a cada variable se le asignará un rango: pobre, medio o excelente.

Tabla 6.2. Correlación entre la condición de la variable y el rango de incertidumbre asignada para la metodología basada en la simulación de Monte Carlo.

Condición de la variable	Rango de incertidumbre
POBRE	0 - 3
MEDIA	4 - 6
EXCELENTE	7 - 10

Una vez obtenidos los rangos para cada variable, se necesitan hacer las iteraciones correspondientes para obtener diferentes valores de los factores y, consecuentemente, del modificador de la frecuencia. El número de iteraciones para la metodología propuesta se ha fijado en 1000, ya que se considera que es un número suficiente de iteraciones para obtener valores representativos.

Por lo tanto, se realizan las 1000 iteraciones necesarias para obtener diferentes valores de incertidumbre de todas las variables y de los factores, según sus ecuaciones correspondientes. Por ejemplo, en la Tabla 6.3 se muestran diferentes iteraciones para las tres variables correspondientes al factor organizacional (α): en caso de que la variable contratación (a) tenga condiciones pobres, la variable formación (b) tenga condiciones medias y la de comunicación e informe (c) condiciones excelentes.

Tabla 6.3. Primeras iteraciones para obtener valores del factor organizacional

Número de iteración	a (Pobres) 0-3	b (Medias) 4-6	c (Excelentes) 7-10	α
1	2,51	4,54	7,05	5,51
2	1,58	5,12	9,45	3,54
3	0,99	4,02	8,21	4,99
:	:	:	:	:
1000	1,59	5,95	7,21	3,55

De la misma manera, se hacen todas las iteraciones para todas las variables (a –h), obteniendo así, diferentes resultados para cada uno de los factores (γ , β y α) y por consiguiente, del modificador de la frecuencia.

6.4.3.2 Obtención del modificador basado en Monte Carlo

Una vez realizadas todas las iteraciones fijadas para cada variable, se obtendrán mil posibles resultados del modificador. El resultado final, que representará el valor del modificador, se obtiene mediante el valor de la media de los posibles valores de dicho modificador (Figura 6.4). Para ello se han tenido en cuenta las condiciones establecidas, como el tipo de FDP de las variables, el número de iteraciones y el rango de incertidumbre. Para la obtención del modificador se ha utilizado el software “Minitab” (Minitab, 2010), simplemente aplicando el esquema de las variables, los pesos y los resultados del método de evaluación de las empresas. En el anexo I se detalla el uso de este software para la obtención de las iteraciones necesarias para el cálculo del modificador.

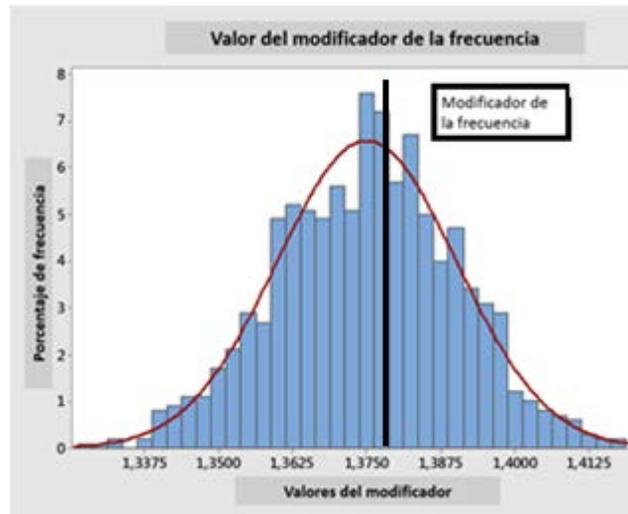


Figura 6.4. Obtención del modificador por Monte Carlo

Una vez establecidas las dos metodologías, que se usaron en esta tesis, para obtener el modificador de la frecuencia que permite considerar el efecto del factor humano en el análisis cuantitativo del riesgo (lógica difusa y simulación de Monte Carlo), se necesitan establecer los escenarios para probar dicha consideración. En el siguiente capítulo, se presentan los casos de estudio utilizados para probar estas metodologías y, a la vez, obtener los valores de los modificadores de la frecuencia.

Capítulo VII. Evaluación de casos de estudio y obtención de los modificadores

En este capítulo se presentan cuatro casos de estudio basados en plantas químicas reales, que han permitido evaluar las metodologías desarrolladas.

En primer lugar, se introduce el método de evaluación del comportamiento de la empresa para obtener las condiciones de los factores humanos. Después, se interpretan los resultados de este método de evaluación. Con ello, se han obtenido los datos necesarios para poder aplicar las dos metodologías desarrolladas. En el caso de la metodología basada en la lógica difusa, la evaluación proporciona los valores de entrada para su fusificación. Para la metodología basada en la simulación de Monte Carlo, la evaluación da el rango de incertidumbre necesario para continuar con su proceso.

Finalmente, se presentan dos casos de estudio relacionados con empresas reales que almacenan o procesan productos inflamables, y se obtienen dos modificadores de frecuencia para cada uno de estos casos de estudio aplicando las dos metodologías desarrolladas. Después, se presentan dos casos de estudio de empresas que almacenan productos tóxicos e inflamables y se obtienen sus respectivos modificadores de frecuencia.

7.1 Introducción

Para poder probar los modelos propuestos, se presentan cuatro casos de estudio diferentes. Tal como se explicó en los capítulos V y VI se necesitan valores numéricos de entrada para que los sistemas propuestos arrojen por un lado un valor del modificador difuso de la frecuencia y, por otro, rangos de incertidumbre para obtener el modificador de Monte Carlo.

Estos valores iniciales de todas las variables para las dos metodologías fueron obtenidos mediante el método de evaluación del comportamiento de la empresa que se explica a continuación.

7.2 Método de evaluación del comportamiento de la empresa

Como ya se ha mencionado, para poder utilizar los modelos propuestos se necesita de un análisis del rendimiento y comportamiento de la compañía en relación a las variables determinadas. Con la información obtenida a través de este método de evaluación, es posible asignar a las variables lingüísticas el valor numérico o el rango de incertidumbre necesarios para las dos metodologías propuestas.

Para ello, se construyó un cuestionario con 8 preguntas para cada variable en base a la metodología propuesta por la HSE en el documento: “Managing contactors – A guide for employers” (HSE, 2011). Cada una de estas ocho preguntas fueron respondidas por un el responsable de seguridad de la compañía que tiene el conocimiento necesario para poder evaluarla.

Dichas preguntas representan y cubren todos los aspectos de la definición de las variables establecidas en el modelo explicadas en el capítulo V. También tienen en cuenta las normativas nacionales, europeas e internacionales. Un ejemplo de las ocho preguntas establecidas para cada variable se puede observar en la Figura 7.1. Éstas son las correspondientes a la variable “Comunicación e Informe” del factor organizacional. Las preguntas de esta variable se realizaron en base a los documentos de la “Occupational Health

and Safety Assessment Series” (OHSAS, 2009) y la “International Labor Organization” (ILO, 2001). El resto de las preguntas para cada una de las variables restantes del modelo, así como las a las normativas en las que se basaron se encuentran en el anexo J.

1. ¿Cuándo existe alguna modificación dentro de organización de la empresa ésta es comunicada satisfactoriamente a todos los empleados?	(a) Sí	(b) La mayoría del tiempo	(c) Ocasionalmente
2. ¿Existe una buena comunicación entre los empleados del mismo nivel jerárquico, de manera que no se presenten conflictos entre ellos?	(a) Sí	(b) No lo sabe	(c) No
3. ¿Cuándo ocurre algún incidente, el empleado sabe a quién recurrir para informarlo?	(a) Sí	(b) Usualmente	(c) Casi nunca
4. ¿Existe una clara jerarquización de puestos de trabajo en la empresa desde el director, gerencia, supervisores y trabajadores y ésta es comunicada a todos los trabajadores?	(a) Sí	(b) Usualmente	(c) No
5. ¿Se ha detectado que los trabajadores no informan de algún incidente menor o mayor ocurrido?	(a) Sí	(b) Ha llegado a suceder	(c) Nunca ha pasado
6. ¿Se analizan regularmente los informes de los Accidentes con el fin de prevenirlos?	(a) Siempre	(b) Cuando es posible	(c) Casi nunca
7. ¿Los empleados tienen plena facilidad de presentar sus opiniones/quejas/sugerencias a cualquier nivel jerárquico de la organización?	(a) Sí	(b) Usualmente	(c) No
8. ¿Los trabajadores tienen claro sus roles y responsabilidades asignados en la empresa, por lo que no se involucran negativamente en las actividades de otros empleados?	(a) Sí	(b) A veces	(c) No

Figura 7.1. Preguntas del cuestionario de evaluación de la empresa para la variable “Comunicación e Informe”.

7.2.1 Interpretación de resultados para el caso de la lógica difusa

Cada una de las respuestas correspondientes a cada pregunta tienen un valor numérico ($a=8$, $b=5$, $c=2$). El resultado obtenido por la suma de los valores numéricos de las 8 preguntas es comparado con un rango establecido. De esta manera, tal como se ve en la Tabla 7.1, se puede asignar una variable lingüística dependiendo del resultado de la suma de valores: “Pobre” (16-32), “Aceptable” (33-47) o “Excelente” (48-64). También se le asigna un valor numérico dependiendo del resultado de cada variable, este valor es el valor inicial del modelo que se introduce en el sistema.

Tabla 7.1. Correlación entre el valor final, variables lingüísticas y el valor numérico asignado para la metodología basada en la lógica difusa.

Variable lingüística	Rango	Valor numérico
POBRE (16-32)	16-19	0
	20-23	1
	24-27	2
	28-32	3
ACEPTABLE (33-47)	33-37	4
	38-42	5
	43-47	6
EXCELENTE (48-64)	48-52	7
	53-56	8
	57-60	9
	61-64	10

Una vez obtenidos estos valores, que como se ha mencionado anteriormente representan las “condiciones de entrada” o valores numéricos de entrada del modelo, se pueden introducir en el sistema.

Estos valores de entrada fueron introducidos en el “*fuzzy toolbox*” de “*Matlab*”, en donde se ha construido el sistema con las reglas provenientes del cuestionario. Cada uno de estos valores representan las condiciones de cada variable dentro de la empresa. La condición de entrada de la variable en cuestión afectará de manera diferente, primeramente al factor organizacional, características del trabajo o características personales y, consecuentemente, al modificador difuso de la frecuencia. En la Figura 7.2 se observa la diferente afectación de las variables “Formación” y “Subcontratación” sobre el “Factor Organizacional”, como consecuencia.

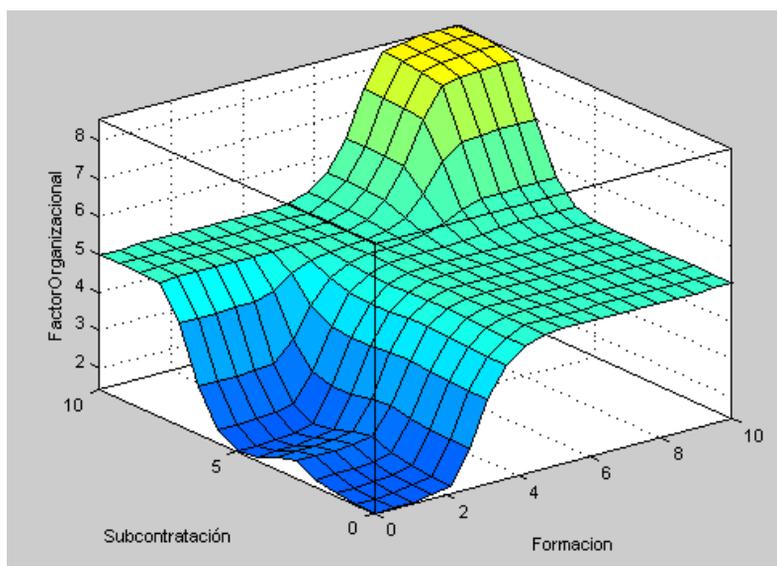


Figura 7.2. Comparación de la afectación en el Factor Organizacional de la variable subcontratación contra la variable formación.

Después, se ha aplicado el proceso de la lógica difusa (Figura 5.2), para que en su última etapa (la defusificación) se pueda obtener el valor del modificador difuso de la frecuencia.

7.2.2 Interpretación de resultados para el caso de la simulación de Monte Carlo

Para la simulación de Monte Carlo, se usa el mismo sistema de puntuación ($a=8$, $b=5$, $c=2$). Sin embargo, se asigna un rango de incertidumbre dependiendo del resultado obtenido a través de la suma de puntuaciones de las preguntas. De esta manera, como se observa en la Tabla 7.2, se pueden asignar tres rangos diferentes de incertidumbre a cada una de las variables.

Tabla 7.2. Correlación entre el valor final, condición de la variable y el rango de incertidumbre asignada para la metodología basada en la simulación de Monte Carlo.

Condición de la variable	Valor	Rango de incertidumbre
POBRE	16 - 32	0 - 3
ACEPTABLE	33 - 47	4 - 6
EXCELENTE	48 - 64	7 - 10

Como ya se explicó en la sección 6.4, una vez asignados estos rangos, dependiendo de la condición de las variables (factores humanos), y después de las iteraciones necesarias que, según la metodología propuesta, se fijó en 1000, se obtiene el valor del modificador de la frecuencia, el cual es calculado por el valor medio de la FDP seleccionada.

El cuestionario de evaluación se ha aplicado para los cuatro casos de estudio propuestos. Con los resultados de cada uno de ellos se han obtenido los modificadores de la frecuencia para cada metodología desarrollada.

7.3 Casos de estudio de empresas de productos inflamables

En esta sección, dos casos de estudio que corresponden a dos empresas que tratan o almacenan productos inflamables han sido analizados.

7.3.1 Caso de estudio A

Es una empresa que almacena y distribuye gas licuado de petróleo (LPG). La planta tiene una extensión de 25000 m², de los cuales 11500 m² están ocupados. La compañía cuenta con un área de oficinas y otra de almacenamiento, en la cual hay un tanque de butano de 213 m³ y otro tanque de 115 m³ de propano, ambos presurizados y con un volumen útil del 85%, ninguno de ellos tiene cubeta de contención.

La empresa cuenta con 198 empleados directos contratados por la empresa, de éstos, 152 son empleados con turnos de trabajo fijos y el resto con turnos rotatorios de 8 horas. La compañía también cuenta con personal subcontratado para operaciones específicas dentro de la empresa.

Después de que el responsable de seguridad de la empresa de este caso de estudio respondiera la encuesta del método de evaluación propuesto en la sección 7.2, se obtuvo la puntuación total de cada variable. De acuerdo con el método, se obtuvieron las puntuaciones finales de cada grupo de variables y se les pudo asignar un conjunto difuso. En la Tabla 7.3, se encuentran las respuestas a las 8 preguntas del primer grupo de variables (factor organizacional) con su puntuación. El resto de las respuestas de cada una de las preguntas para determinar el resto de valores de entrada se encuentran en el anexo K.

Tabla 7.3. Respuestas del responsable de seguridad de la empresa.

Pregunta	Factores Organizacionales								
	Subcontratación			Formación			Comunicación e Informe		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1			2		5				2
2		5				2		5	
3			2			2		5	
4			2			2		5	
5			2			2		5	
6			2		5			5	
7			2			2			2
8			2		5			5	
Suma:	19			25			34		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Pobres			Condiciones Pobres			Condiciones Medias		

A continuación, se presentan los resultados para la obtención del modificador difuso usando las respuestas del cuestionario de evaluación del comportamiento de la empresa.

7.3.1.1 Obtención del modificador de la frecuencia mediante la metodología basada en la lógica difusa

Después de obtener los resultados del comportamiento de la empresa, de acuerdo con las respuestas del responsable de seguridad, se pudieron obtener todos los resultados de las variables que están contenidos en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Valores numéricos obtenidos de la encuesta de la empresa del caso de estudio A.

Factor	Variable	Puntuación total	Conjunto difuso	Valor numérico
Factor organizacional	Subcontratación	19	Pobre	0
	Formación	25	Pobre	2
	Comunicación e Informe	34	Medias	4
Factor de las características del trabajo	Gestión de la carga de trabajo	34	Medias	4
	Condiciones medioambientales	43	Medias	6
	Equipamiento de seguridad	22	Pobre	1
Factor de las características personales	Comportamiento personal	31	Pobre	3
	Habilidades y Conocimientos	28	Pobre	3

Estos valores representan las “condiciones de entrada” del modelo propuesto y se introducen en el software Matlab. De acuerdo con la metodología de la lógica difusa descrita en la sección 5.2, estos valores de entrada pasan por un proceso de fusificación, inferencia difusa y defusificación como se explicó en el capítulo V.

De acuerdo con la metodología propuesta, se obtuvieron los valores finales de los factores, así como el valor del modificador difuso para este caso de estudio. En la Figura 7.3 se puede observar el valor del modificador difuso de la frecuencia. Este se obtuvo después de introducir los valores de los factores que se consiguieron mediante los resultados del cuestionario de evaluación del comportamiento de la empresa.

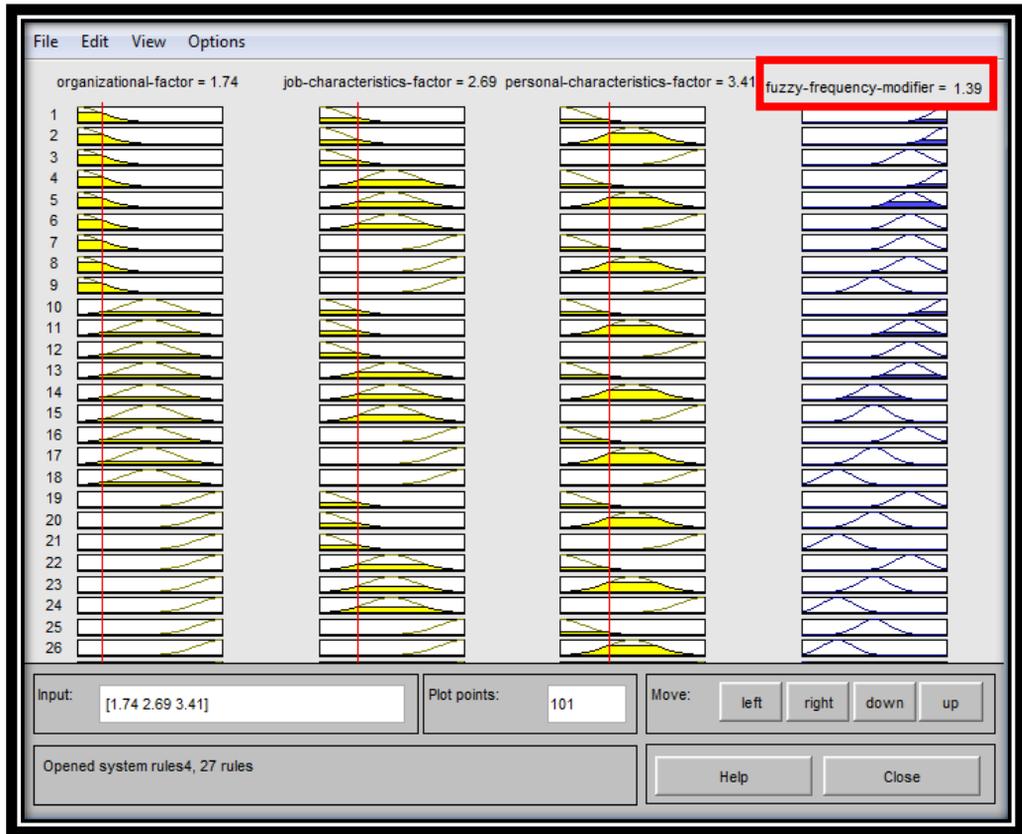


Figura 7.3. Obtención del valor del factor organizacional del caso de estudio A.

Tal como se explicó en la sección 5.2, dentro de la metodología se incluyeron los pesos de las variables, esto permitió obtener diferentes resultados: el valor del modificador sin tomar en cuenta el peso de las variables y el valor teniendo en cuenta estos pesos. En la Tabla 7.5 se puede observar los valores obtenidos de los factores y del modificador difuso de la frecuencia, tanto en el caso en que se tomen o no en cuenta los pesos de las variables. Cabe decir que la escala de los factores como se comentó en el capítulo V, va del 1 al 10, siendo el 10 el mejor resultado del factor. En cambio, el modificador tiene una escala de 1 – 1,5, siendo el mejor valor el 1. Esto supone que los factores y el modificador sean inversos, de manera que valores altos de los factores, suponen modificadores bajos

Tabla 7.5. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio A

Variable	Valor con pesos	Valor sin pesos
Factor organizacional	1,48	1,74
Factor de las características del trabajo	2,69	2,69
Factor de las características personales	3,41	3,41
MODIFICADOR DIFUSO DE LA FRECUENCIA	1,41	1,39

Como se puede observar el valor del modificador de este caso de estudio es relativamente alto, teniendo en cuenta que el valor máximo del modificador es 1,50. Esto es debido a que, según el responsable de seguridad de la empresa, las condiciones de los factores humanos de esta empresa son en su mayoría “pobres”. La diferencia entre los valores del modificador con pesos y sin pesos no es muy significativa, ya que, como se pudo observar, el único factor que sufre cambios por la influencia de los pesos de las variables es el factor organizacional. Por ello, aunque se presente para cada caso de estudio los valores del modificador con peso y sin peso, para el cálculo de los resultados (capítulo 8) sólo se han utilizado los valores del modificador con pesos. Esta decisión se debe al hecho de que se quiere mantener en la metodología el criterio de los expertos que habían diferenciado el peso de las variables relacionadas con el factor organizacional.

7.3.1.2 Obtención del modificador de la frecuencia por la metodología basada en la simulación de Monte Carlo

Como ya se ha mencionado en la sección 7.2, la puntuación obtenida del responsable de seguridad de la empresa es la misma para las dos metodologías. Por lo tanto, se han obtenido los rangos de incertidumbre de acuerdo con la Tabla 7.5 para cada una de las variables, estos rangos están contenidos en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6. Rangos de incertidumbre obtenidos de la encuesta de la empresa A.

Variable	Puntuación total	Condición de la variable	Rango de incertidumbre	FDP
Subcontratación	19	Pobre	0-3	Uniforme
Formación	25	Pobre	0-3	Uniforme
Comunicación e Informe	34	Medias	4-6	Uniforme
Gestión de la carga de trabajo	34	Medias	4-6	Uniforme
Condiciones medioambientales	43	Medias	6-6	Uniforme
Equipamiento de seguridad	22	Pobre	0-3	Uniforme
Comportamiento personal	31	Pobre	0-3	Uniforme
Habilidades y Conocimientos	28	Pobre	0-3	Uniforme

El siguiente paso, de acuerdo con la metodología propuesta, es hacer las iteraciones del rango de incertidumbre asignado para cada una de las variables (a-h), así como para cada uno de los factores (α , β y γ). Las primeras 5 iteraciones, así como la última se muestran en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7. Primeras 5 iteraciones y última de las variables para el caso de estudio A.

Número de iteración	a	b	c	d	e	f	g	h	α	β	γ
1	0,66	2,1	4,37	5,4	5,34	1,42	0,45	1,06	2,27	4,05	0,75
2	2,97	2,63	4,24	4,04	5,75	2,57	0,37	1,42	3,02	4,12	0,89
3	0,25	0,72	5,57	5,04	5,15	2,24	2,25	1,98	1,6	4,14	2,12
4	2,25	0,5	4,86	4,61	4,47	2,77	1,57	0,25	1,72	3,95	0,91
5	2,94	2,79	4,88	5,98	4,14	2,93	2,82	2,6	3,24	4,35	2,71
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
1000	2,83	1,63	4,57	4,04	5,58	2,04	0,34	1,27	2,46	3,89	0,8

Una vez realizadas todas las iteraciones de cada una de las variables se han obtenido múltiples valores del modificador, como ya se ha explicado en la sección 6.3. El valor medio

basado en una distribución uniforme será el valor del modificador. Para este caso de estudio A, el valor del modificador como se puede observar en la Figura 7.4 es de 1,37.

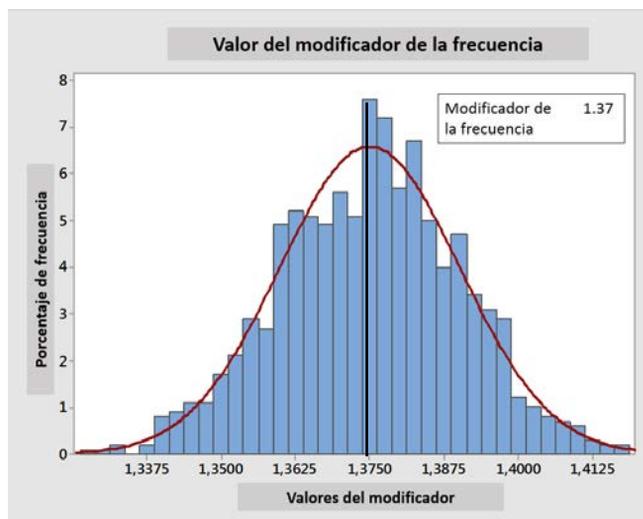


Figura 7.4. Obtención del valor del modificador del caso de estudio A por simulación de Monte Carlo.

Como se puede observar, aplicando estas dos metodologías se obtienen valores similares. En el caso del modificador difuso de la frecuencia el valor es de 1,41, teniendo en cuenta los pesos de las variables. Mientras que el modificador de la frecuencia obtenido con Monte Carlo es de 1,37, siendo el modificador difuso un poco más conservador con respecto al modificador basado en Monte Carlo.

7.3.2 Caso de estudio B

La actividad principal de esta empresa es la del almacenaje, envasado de gases y líquidos inflamables así como del desarrollo de gases para usos industriales. Las instalaciones ocupan una superficie de 7000 m² y en sus alrededores se encuentran otros establecimientos.

La planta cuenta con diferentes zonas de trabajo pero la más importante es la del almacenaje de materias primas. Para llevar a cabo esta actividad, la instalación cuenta con

un tanque aéreo de almacenaje de GLP de una capacidad de 46,6 toneladas a la presión de vapor del GLP y temperatura ambiente, este tanque cuenta con un sistema de refrigeración y detectores de llama con activación manual del sistema de refrigeración.

La instalación también cuenta con un tanque de almacenamiento de etileno criogénico de una capacidad de 24 toneladas a 6 bares de presión y -65°C de temperatura. Este tanque dispone de un aislamiento de doble capa y detectores de vacío entre capas para detectar fugas.

La empresa cuenta con 85 empleados directos contratados por la empresa, de éstos, 78 son empleados con turnos de trabajo fijos y el resto con turnos rotatorios de 8 horas. La compañía también cuenta con personal subcontratado para operaciones específicas dentro de la empresa.

7.3.2.1 Obtención del modificador de la frecuencia por la metodología basada en la lógica difusa

Se ha utilizado el mismo cuestionario de evaluación propuesto al principio de este capítulo y después de que el responsable de seguridad de la empresa de este caso de estudio respondiera al cuestionario, se obtuvo la puntuación total de cada variable, tal como muestran los resultados contenidos en la Tabla 7.8. Todos los resultados de cada una de las variables pueden verse en el anexo K.

Tabla 7.8. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio B.

Factor	Variable	Puntuación total	Conjunto difuso	Valor numérico
Factor organizacional	Subcontratación	64	Excelente	10
	Formación	64	Excelente	10
	Comunicación e Informe	58	Excelente	9
Factor de las características del trabajo	Gestión de la carga de trabajo	64	Excelente	10
	Condiciones medioambientales	64	Excelente	10
	Equipamiento de seguridad	64	Excelente	10
Factor de las características personales	Comportamiento personal	52	Excelente	7
	Habilidades y Conocimientos	52	Excelente	7

Se ha seguido la misma metodología que la propuesta en la sección 5.2 basada en la lógica difusa, por lo que después de la obtención de estos valores de entrada del modelo y pasando por sus diferentes etapas, se han obtenido los valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia. En la Figura 7.5 se muestra el valor obtenido del modificador después de este proceso (1,16).

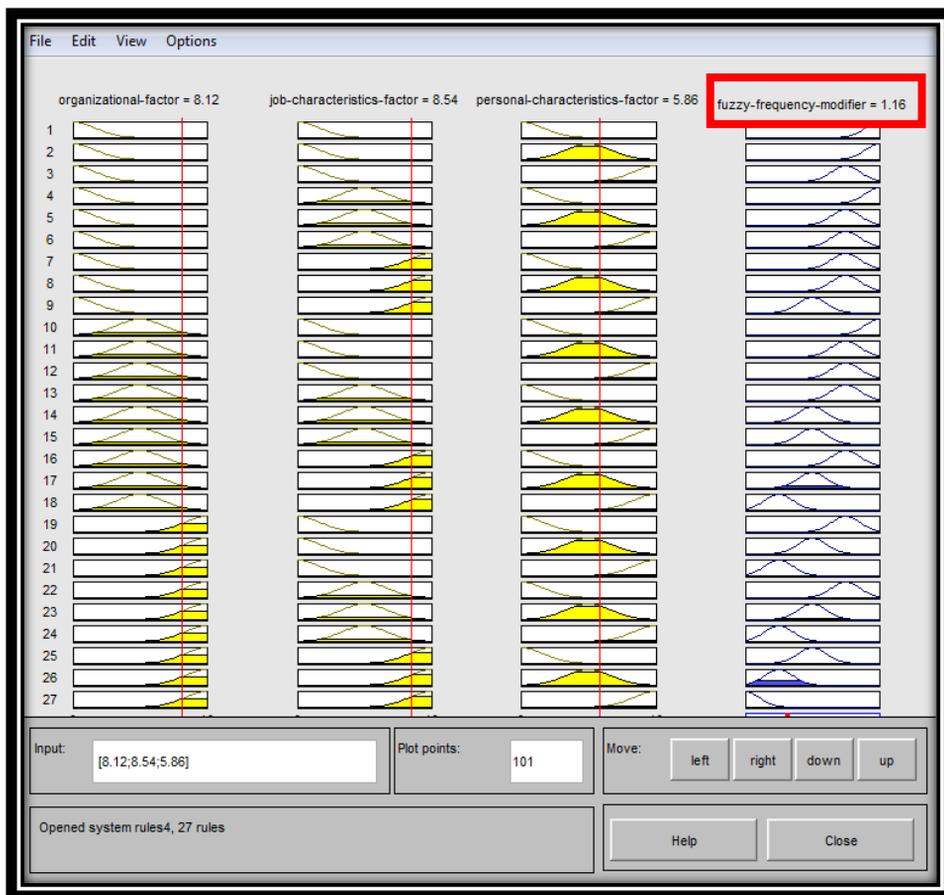


Figura 7.5. Obtención del valor del factor organizacional del caso de estudio B.

Como se ve en la Tabla 7.9, la diferencia entre los valores del modificador difuso de la frecuencia no considerando los pesos y considerando los pesos no es significativa. Por ello, como ya se ha explicado en el caso de estudio anterior, solo se tendrá en cuenta el valor del modificador con pesos.

Tabla 7.9. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio B.

Variable	Valor con pesos	Valor sin pesos
Factor organizacional	8,12	8,42
Factor de las características del trabajo	8,54	8,54
Factor de las características personales	5,86	5,86
MODIFICADOR DIFUSO DE LA FRECUENCIA	1,16	1,15

En este caso de estudio B, se ha obtenido un valor del modificador relativamente “bajo” (1,16), teniendo en cuenta que el valor mínimo del modificador es 1. Esto era de esperar ya que las condiciones de los factores humanos para este caso de estudio fueron en su mayoría “Excelentes”.

7.3.2.2 Obtención del modificador de la frecuencia por la metodología basada en la simulación de Monte Carlo

Teniendo en cuenta los mismos resultados del cuestionario de evaluación del comportamiento de la empresa para este caso de estudio, se han obtenido los rangos de incertidumbre para cada una de las variables, los cuales están contenidos en la Tabla 7.10.

Tabla 7.10. Rangos de incertidumbre obtenidos de la encuesta de la empresa B.

Variable	Puntuación total	Condición de la variable	Rango de incertidumbre	FDP
Subcontratación	64	Excelente	7-10	Uniforme
Formación	64	Excelente	7-10	Uniforme
Comunicación e Informe	58	Excelente	7-10	Uniforme
Gestión de la carga de trabajo	64	Excelente	7-10	Uniforme
Condiciones medioambientales	64	Excelente	7-10	Uniforme
Equipamiento de seguridad	64	Excelente	7-10	Uniforme
Comportamiento personal	52	Excelente	7-10	Uniforme
Habilidades y Conocimientos	52	Excelente	7-10	Uniforme

Siguiendo la misma metodología propuesta, como en el caso de estudio anterior, se hicieron las iteraciones entre los rangos de incertidumbre para cada una de las variables (a-h), así como para cada uno de los factores (α , β y γ), las primeras 5 iteraciones así como la última se muestran en la Tabla 7.11.

Tabla 7.11. Primeras 5 iteraciones y última de las variables del modelo para el caso de estudio B.

Número de iteración	a	b	c	d	e	f	g	h	α	β	γ
1	9,72	7,56	8,11	7,54	7,57	8,46	9,18	9,45	8,1	7,85	9,32
2	8,38	9,8	9,53	8,84	9,66	9,37	7,2	9,85	9,46	9,29	8,52
3	8,55	7,85	9,4	9,31	9,72	7,61	7,88	8,83	8,3	8,88	8,36
4	8,4	7,67	7,26	9,96	8,45	7,93	8,3	9,49	7,73	8,78	8,9
5	9,72	7,56	8,11	7,54	7,57	8,46	9,18	9,45	8,1	7,85	9,32
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
1000	7,97	9,89	7,27	9,69	7,23	7,11	8,89	9,29	8,98	8,01	9,09

De igual manera que en el caso de estudio A, una vez realizadas todas las iteraciones de cada una variables se obtuvieron múltiples valores del modificador. Por lo tanto, el valor del modificador fue representado por el valor medio basado en una distribución uniforme. Para este caso de estudio B, el valor del modificador como se puede observar en la Figura 7.6 es de 1,07.

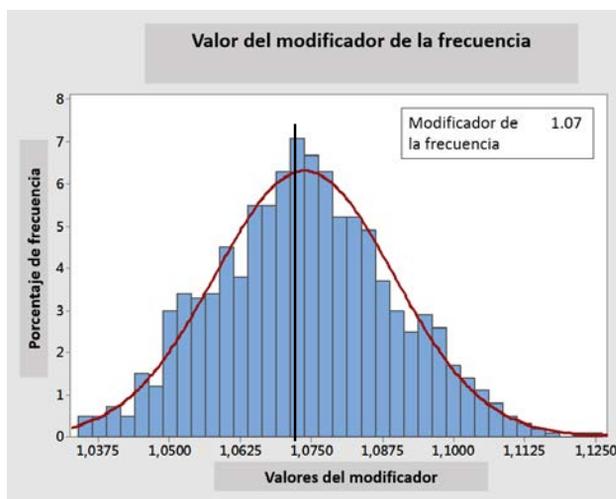


Figura 7.6. Obtención del valor del modificador del caso de estudio B por simulación de Monte Carlo.

Igual que en el caso anterior, los valores de los modificadores de frecuencia de cada metodología son similares, aunque la diferencia entre ellos en este caso es un poco mayor. Aun así, el valor del modificador de 1,16 obtenido por la lógica difusa es ligeramente más conservador que el de 1,07 obtenido por Monte Carlo.

7.4 Casos de estudio de empresas con productos tóxicos e inflamables

En esta sección, se presentan dos casos de estudio que corresponden a dos empresas que tratan o almacenan productos inflamables y tóxicos. Al tratar con este tipo de sustancias, se tienen que tomar en cuenta otras consideraciones debido al tipo de accidente que pueden provocar, como es la dispersión tóxica. Al igual que en los casos de estudio de empresas de

almacenamiento de productos inflamables, se han obtenido dos modificadores para cada uno de los casos.

7.4.1 Caso de estudio C

Esta empresa tiene como actividad principal la recepción, almacenamiento, dilución y expedición de productos químicos diversos. Los productos sólidos se almacenan en sacos y los líquidos en tanques atmosféricos. Las instalaciones ocupan un área de 18000 m². La planta cuenta con varias instalaciones, de las cuales, con respecto al almacenamiento de sus productos, cabe destacar una zona de almacenamiento de formol que contiene 4 tanques, tres de 30 m³ y uno de 45 m³ a temperatura y presión atmosférica. Estos tanques están situados dentro de un cubeto de contención.

Esta empresa también cuenta con una zona de almacenamiento de ácido acético situado en el mismo cubeto que el formol. Esta zona de almacenamiento cuenta con dos tanques de 35 m³ a 28°C y presión atmosférica. La empresa cuenta con 97 empleados directos contratados por la empresa, de éstos, 51 de turno y el resto con turnos rotatorios de 8 horas. La compañía también cuenta con personal subcontratado para operaciones específicas dentro de la empresa.

De igual manera que en los dos primeros casos de estudio de almacenamiento de productos inflamables, se utilizó el mismo método de evaluación propuesto. Así se obtuvieron las puntuaciones finales de cada una de las variables. Las respuestas de la evaluación de este caso de estudio se encuentran en el anexo K.

7.4.1.1 Obtención del modificador de la frecuencia por metodología basada en la lógica difusa

Una vez que el responsable de seguridad de la empresa de este caso de estudio respondiera el cuestionario de evaluación, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio C.

Factor	Variable	Puntuación total	Conjunto difuso	Valor numérico
Factor organizacional	Subcontratación	25	Pobre	2
	Formación	34	Medias	4
	Comunicación e Informe	40	Medias	5
Factor de las características del trabajo	Gestión de la carga de trabajo	40	Medias	5
	Condiciones medioambientales	43	Medias	6
	Equipamiento de seguridad	31	Pobre	3
Factor de las características personales	Comportamiento personal	28	Pobre	3
	Habilidades y Conocimientos	25	Pobre	2

De igual manera que en los casos anteriores se obtuvieron los valores finales de los factores así como el valor del modificador difuso considerando y sin considerar el peso de las variables. En la Tabla 7.13 se muestran los valores de los tres factores del modelo así como el valor del modificador difuso de la frecuencia con y sin pesos.

Tabla 7.13. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio C

Variable	Valor con pesos	Valor sin pesos
Factor organizacional	3,19	4,71
Factor de las características del trabajo	4,44	4,44
Factor de las características personales	1,67	1,67
MODIFICADOR DIFUSO DE LA FRECUENCIA	1,37	1,35

Este valor del modificador difuso de la frecuencia, al igual que el caso de estudio A, es alto. Esto es comprensible debido a que las condiciones de sus factores de acuerdo con el cuestionario de evaluación son en su mayoría pobres con algunas condiciones medias.

7.4.1.2 Obtención del modificador de la frecuencia por la metodología basada en la simulación de Monte Carlo

Teniendo en cuenta los mismos resultados del cuestionario de evaluación del comportamiento de la empresa para este caso de estudio, se obtuvieron los rangos de incertidumbre para cada una de las variables, que están contenidas en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio C.

Variable	Puntuación total	Condición de la variable	Rango de incertidumbre	FDP
Subcontratación	25	Pobre	0 - 3	Uniforme
Formación	34	Medias	4 - 6	Uniforme
Comunicación e Informe	40	Medias	4 - 6	Uniforme
Gestión de la carga de trabajo	40	Medias	4 - 6	Uniforme
Condiciones medioambientales	43	Medias	4 - 6	Uniforme
Equipamiento de seguridad	31	Pobre	0 - 3	Uniforme
Comportamiento personal	28	Pobre	0 - 3	Uniforme
Habilidades y Conocimientos	25	Pobre	0 - 3	Uniforme

Siguiendo el mismo procedimiento de los casos anteriores, se hicieron las iteraciones entre los rangos de incertidumbre para cada una de las variables, así como para cada uno de los factores representados del modelo. Las primeras 5 iteraciones para este caso de estudio, así como la última, se muestran en la Tabla 7.15.

Tabla 7.15. Primeras 5 iteraciones y última de las variables del modelo para el caso de estudio C.

Número de iteración	a	b	c	d	e	f	g	h	α	β	γ
1	1,27	4,22	4,12	4,22	5,36	1,2	0,93	2,61	1,27	4,22	4,12
2	0,53	4,51	5,69	4,14	5,98	0,75	2,78	2,56	0,53	4,51	5,69
3	1,21	5,88	4,33	4,8	4,03	2,01	1,71	0,33	1,21	5,88	4,33
4	1,57	4,91	4,83	4,66	5,65	0,83	1,1	1,76	1,57	4,91	4,83
5	2,33	4,55	4,27	4,86	4,58	2,4	1,82	1,3	2,33	4,55	4,27
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
1000	0,15	4,83	5,05	4,35	4,61	0,33	2,23	2,47	0,15	4,83	5,05

Después de realizar todas las iteraciones se obtiene el valor del modificador de la frecuencia basado en Monte Carlo usando el valor medio de una distribución uniforme. Para este caso de estudio C, el valor del modificador, como se puede observar en la Figura 7.7, es de 1,34.

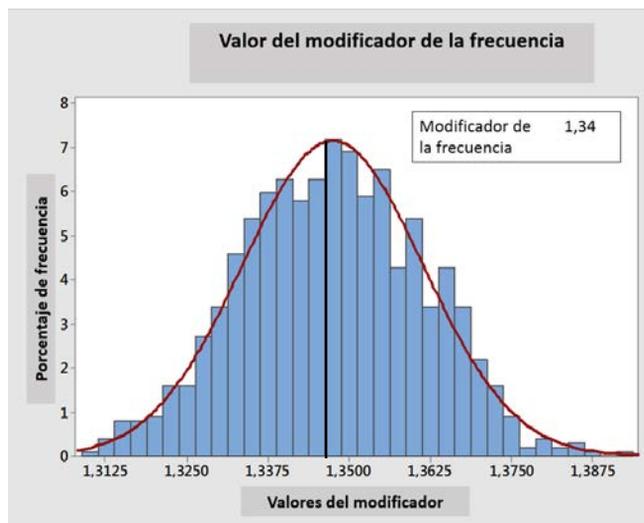


Figura 7.7. Obtención del valor del modificador del caso de estudio C por simulación de Monte Carlo.

En este caso de estudio, la diferencia entre los modificadores obtenidos por ambas metodologías (1,35 y 1,34) es mucho menor. Aun así, igual que en los casos anteriores, el

valor del modificador obtenido por la lógica difusa es un poco más conservador que el obtenido por simulación de Monte Carlo.

7.4.2 Caso de estudio D

Esta empresa tiene como actividad principal la síntesis orgánica de productos básicos para la industria farmacéutica y veterinaria. El establecimiento dispone de las instalaciones necesarias para la producción en discontinuo de diferentes productos químicos. En comparación con los otros casos anteriores, esta empresa cuenta con un número más grande de equipos y zonas. El establecimiento cuenta con diferentes edificios y áreas de producción, servicios, almacenaje, oficinas, laboratorios, etc.

La zona de almacenaje cuenta con un área de tanques en donde se almacenan diferentes productos tales como acetona, acetato de etilo, etanol, tolueno, metanol, isopropanol, disolución de amoníaco al 25% y sosa. Este caso de estudio se ha centrado en el área de depósitos de productos inflamables y tóxicos en donde se almacena el metanol y la acetona. Esta área de almacenamiento cuenta con 8 tanques aéreos cilíndricos verticales de materia prima y residuos líquidos.

La empresa cuenta con 211 empleados directos contratados por la empresa, de éstos, 143 son de turno fijo y el resto con turnos rotatorios de 8 horas. La compañía también cuenta con personal subcontratado para operaciones específicas dentro de la empresa.

Se utilizó el mismo cuestionario de evaluación propuesto. De tal manera que se obtuvieron las puntuaciones finales de cada una de las variables. Las respuestas del cuestionario de evaluación de donde se han obtenido los resultados de este caso de estudio D se encuentran en el anexo K.

7.4.2.1 Obtención del modificador de la frecuencia por metodología basada en la lógica difusa

Un ejemplo de los resultados del cuestionario de evaluación del comportamiento correspondiente a esta empresa se muestra en la Tabla 7.16.

Tabla 7.16. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio D.

Factor	Variable	Puntuación total	Conjunto difuso	Valor numérico
Factor organizacional	Subcontratación	64	Excelente	10
	Formación	64	Excelente	10
	Comunicación e Informe	56	Excelente	8
Factor de las características del trabajo	Gestión de la carga de trabajo	64	Excelente	10
	Condiciones medioambientales	64	Excelente	10
	Equipamiento de seguridad	64	Excelente	10
Factor de las características personales	Comportamiento personal	46	Medias	7
	Habilidades y Conocimientos	46	Medias	7

De igual manera que en los casos anteriores, se obtuvieron los valores finales de los factores, así como el del modificador difuso de la frecuencia con y sin peso (Tabla 7.17).

Tabla 7.17. Valores de los factores y del modificador difuso de la frecuencia para el caso de estudio D.

Variable	Valor con pesos	Valor sin pesos
Factor organizacional	7,31	8,24
Factor de las características del trabajo	7,22	7,22
Factor de las características personales	5,05	5,05
MODIFICADOR DIFUSO DE LA FRECUENCIA	1,22	1,21

Este valor del modificador difuso se puede decir que es de tipo “medio”, y corresponde a condiciones entre excelentes y medias de sus factores de acuerdo con su cuestionario de evaluación.

7.4.2.2 Obtención del modificador de la frecuencia por la metodología basada en la simulación de Monte Carlo

Tomando los mismos resultados de la evaluación del comportamiento de la empresa, se han obtenido los rangos de incertidumbre para cada una de las variables que se muestran en la Tabla 7.18.

Tabla 7.18. Resultados de la encuesta de la empresa del caso de estudio D.

Variable	Puntuación total	Condición de la variable	Rango de incertidumbre	FDP
Subcontratación	64	Excelente	7 - 10	Uniforme
Formación	64	Excelente	7 - 10	Uniforme
Comunicación e Informe	56	Excelente	7 - 10	Uniforme
Gestión de la carga de trabajo	61	Excelente	7 - 10	Uniforme
Condiciones medioambientales	61	Excelente	7 - 10	Uniforme
Equipamiento de seguridad	58	Excelente	7 - 10	Uniforme
Comportamiento personal	46	Medias	4 - 6	Uniforme
Habilidades y Conocimientos	46	Medias	4 - 6	Uniforme

Una vez fijados los rangos de incertidumbre, se realizaron las iteraciones pertinentes para cada una de las variables de acuerdo con la metodología propuesta. En la Tabla 7.19 se muestran las primeras 5 iteraciones, así como la última de las variables establecidas.

Tabla 7.19. Primeras 5 iteraciones y última de las variables del modelo para el caso de estudio D.

Número de iteración	a	b	c	d	e	f	g	h	α	β	γ
1	7,92	7,34	8,21	8,36	9,09	9,4	5,07	5,47	7,92	7,34	8,21
2	8,53	9,39	8,93	9,18	7,13	8,95	5,27	5,49	8,53	9,39	8,93
3	8,5	7,73	7,2	8,79	8,93	7,09	4,41	4,4	8,5	7,73	7,2
4	7,64	8,2	7,05	9,49	8,45	9,77	5,7	5,8	7,64	8,2	7,05
5	8,78	8,86	9,41	8,53	8,69	7,33	4,92	4,88	8,78	8,86	9,41
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
1000	7,44	7,28	8,51	9,99	7,84	8,39	4,37	4,64	7,44	7,28	8,51

Teniendo en cuenta todas las iteraciones realizadas, el valor de este modificador, se según la Figura 7.8, es de 1,13.

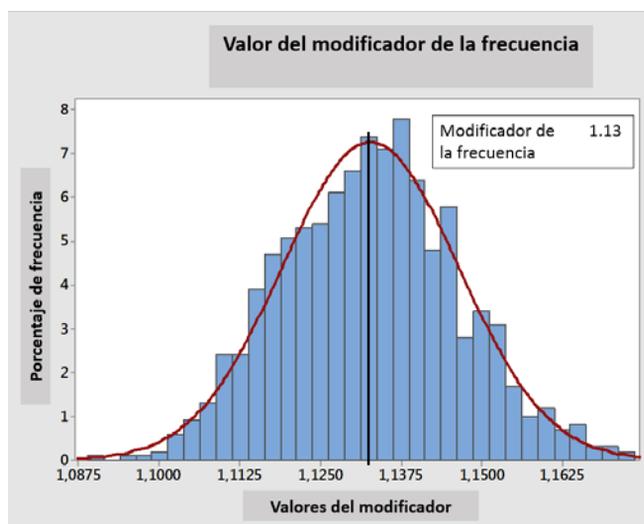


Figura 7.8. Obtención del valor del modificador del caso de estudio D por simulación de Monte Carlo.

En este caso de estudio, la diferencia entre los valores de los modificadores obtenidos ha sido la mayor comparada con los otros casos de estudio (1,22 y 1,13). Cabe destacar que el valor obtenido por la lógica difusa, igual que en el resto de los casos, es el más conservador.

En la Tabla 7.20, se presenta la comparación de los valores de los modificadores obtenidos por las dos metodologías propuestas para todos los casos de estudio.

Tabla 7.20. Comparación de valores de los modificadores mediante las metodologías propuestas.

Caso de estudio	Modificador difuso de la frecuencia	Modificador MC de la frecuencia
A	1,41	1,37
B	1,16	1,07
C	1,37	1,34
D	1,22	1,13

Como se ha mencionado durante la obtención de los valores de los modificadores, se ha observado que los valores obtenidos por la metodología de la lógica difusa han sido más conservadores que los obtenidos mediante simulación con Monte Carlo, ya que los modificadores de la frecuencia son mayores e implican un valor final de la frecuencia mayor. Como se puede observar en la Tabla 7.20, el caso de estudio con menor diferencia entre los valores de sus modificadores es el caso de estudio C (1,37 y 1,34). En cambio, donde se presenta mayor diferencia es en los casos de estudio B (1,16 y 1,07) y D (1,22 y 1,13).

Una vez obtenidos todos los valores de los modificadores de la frecuencia, se han aplicado a diferentes situaciones accidentales, esto ha incrementado la frecuencia final de dichas situaciones y, por lo tanto, el riesgo asociado a las mismas. El efecto de este incremento y su repercusión en el riesgo final asociado a diferentes instalaciones se explica en el próximo capítulo.

Capítulo VIII. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de los modificadores de la frecuencia obtenidos en el capítulo anterior en diferentes situaciones accidentales. Dichos modificadores se han aplicado a los valores de frecuencia para los cuatro casos de estudio que se han presentado en el Capítulo VII.

Las frecuencias se han modificado tanto por el modificador difuso como por el de Monte Carlo. Por otro lado, se han calculado las consecuencias. Finalmente, se ha representado el riesgo para los cuatro casos de estudio con las nuevas curvas de isoriesgo. Una vez vistos todos los resultados, se han comparado y discutido.

8.1 Introducción

Como ya se mencionó en el capítulo I, una de las herramientas más usadas para representar el riesgo es el Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR), esta metodología se basa en la identificación de los escenarios peligrosos, la obtención de las frecuencias finales de los accidentes y de sus consecuencias, con el fin de representar el riesgo gráficamente. Para realizar este tipo de análisis se han obtenido las frecuencias finales que se usan en un ACR y se han modificado dichas frecuencias mediante los modificadores de frecuencia encontrados en el capítulo anterior.

Para obtener estas frecuencias finales, se han identificado los posibles eventos accidentales teniendo en cuenta las características existentes en cada uno de los casos de estudio. Los iniciadores (potenciales sucesos) seleccionados han sido los relacionados con los posibles eventos de pérdida de contención (LOC - *Loss of containment event*) de los tanques existentes en las diferentes empresas.

A cada uno de los LOC, le corresponde una frecuencia inicial, éstas están contenidas en las bases de datos de frecuencia genéricas que se comentaron en el capítulo I. Las frecuencias iniciales seleccionadas para los cuatro casos de estudio fueron obtenidas del BEVI (2009), que no incluyen el factor humano. Según la metodología del ACR, para este caso de escenarios, esta frecuencia inicial es inicialmente corregida por la influencia de varios factores como es el efecto dominó o el número de tanques existentes en la zona. Para obtener las frecuencias de los posibles accidentes relacionados a cada LOC, se ha utilizado información probabilística mediante árboles de eventos (BEVI, 2009). De esta manera, se ha obtenido la frecuencia final de todos los accidentes. Después, como ya se ha indicado anteriormente, estas frecuencias han sido alteradas por los modificadores de frecuencia obtenidos en el capítulo anterior.

Posteriormente, se han obtenido las consecuencias de los accidentes considerados, para finalmente llegar a la representación gráfica del riesgo. La representación del riesgo

individual se ha caracterizado por la presencia de diferentes curvas de isoriesgo que han sido comparadas entre ellas. A continuación, se detallan todos estos aspectos.

8.2 Cálculo de frecuencias finales modificadas

El cálculo de las frecuencias finales es una parte vital en cualquier análisis de riesgo. Para poder estimarlas en un ACR se tienen que tener en cuenta varias consideraciones. La primera de ellas, como se comentó anteriormente, es la identificación de los iniciadores del accidente. Debido a que, en los cuatro casos de estudio, sus zonas principales estudiadas han sido sus zonas de almacenaje con tanques, se han establecido los posibles escenarios de pérdida de contención (LOC) de dichos tanques. Estos valores han sido obtenidos del BEVI (2009) y pueden variar dependiendo de las características de los tanques.

Después, esta frecuencia inicial se ha corregido en función de varios factores como se comentó en el capítulo I. En los casos presentados, los factores que corrigen a dicha frecuencia son el efecto dominó causado por la sustancia involucrada (se debe de multiplicar por dos la frecuencia si la sustancia es inflamable, tal como se muestra en la Tabla 8.1) (Instrucción 14/2008 SIE, 2008), o el número de tanques presentes en el área analizada (se debe multiplicar por el número de tanques) (BEVI, 2009). Una vez obtenidas las frecuencias corregidas, se han usado los árboles de sucesos relacionados con cada LOC para obtener los accidentes finales. Con la información probabilística obtenida de dichos árboles, se ha obtenido la frecuencia final del accidente. Esta frecuencia es la que se utiliza en los ACR sin considerar el efecto del factor humano (el valor es el que se presenta en la última columna de la Tabla 8.1).

Una vez obtenidas estas frecuencias, se han utilizado los modificadores, tanto el modificador difuso como el obtenido mediante simulación de Monte Carlo, para determinar los valores de las frecuencias finales afectados por el factor humano (Tabla 8.3). A continuación, se presenta la estimación de las frecuencias finales, teniendo en cuenta los modificadores de frecuencia, para los cuatro casos de estudio detallados en el capítulo anterior.

8.2.1 Caso de estudio A

Los valores de los modificadores de la frecuencia para este caso de estudio son 1,41 para el modificador difuso y 1,37 para el modificador basado en Monte Carlo (ver sección 7.3.1). Como ya se ha indicado, para aplicar este modificador en la frecuencia de los accidentes, inicialmente se identificaron los posibles eventos de pérdida de contención teniendo en cuenta las características de los tanques de almacenamiento de butano y propano que se encuentran en el caso de estudio analizado. En la Tabla 8.1 se encuentra la frecuencia inicial obtenida de la tabla 13 del BEVI para escenarios de almacenamiento de tanques presurizados no enterrados (BEVI, 2009), para las tres situaciones más comunes en una pérdida de contención. También se encuentra la frecuencia corregida teniendo en cuenta la afectación del efecto dominó.

Tabla 8.1. Frecuencia inicial y corregida para cada suceso de pérdida de contención.

Código	Evento de pérdida de contención (LOC)	Frecuencia inicial	Frecuencia corregida
G1a	Liberación instantánea de todo el contenido	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
G2a	Liberación de todo el contenido en 10 minutos a corriente continua y constante	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
G3a	Liberación continua de todo el contenido desde un orificio con un diámetro efectivo de 10 mm	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

En las Figuras 8.1 y 8.2 se muestran los árboles de eventos correspondientes para una rotura catastrófica de un depósito (iniciador G1a) y para fugas continuas de GLP (iniciadores G2a y G3a), respectivamente. De estos árboles de eventos se han obtenido los datos de probabilidad para obtener la frecuencia final de cada uno de los accidentes considerados.

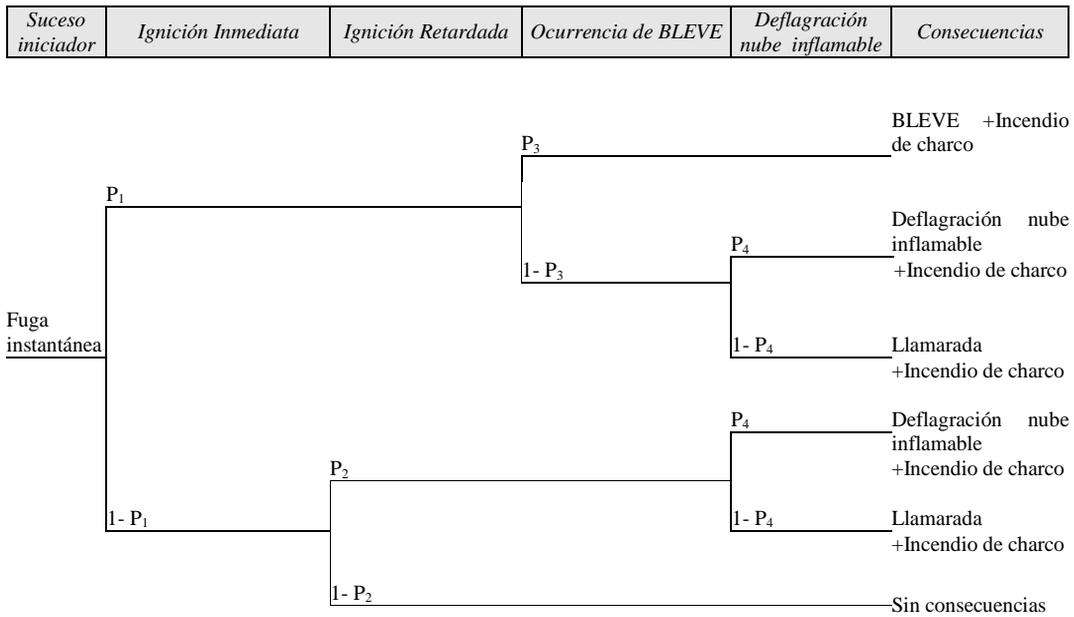


Figura 8.1. Árbol de sucesos de una rotura catastrófica de un depósito de almacenamiento de GLP

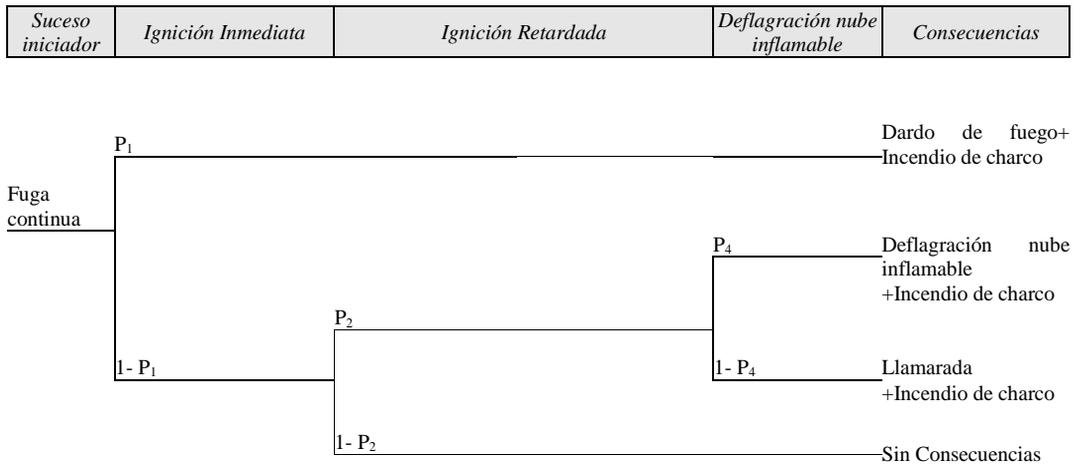


Figura 8.2. Árbol de sucesos para cualquier fuga continua de GLP y etileno criogénico

Con los datos probabilísticos obtenidos de estos árboles de sucesos, se han calculado las frecuencias de los accidentes finales. Estas frecuencias se muestran en la Tabla 8.2 y son las que se utilizan usualmente en un ACR.

Tabla 8.2. Frecuencias de Accidentes para un ACR normal del caso de estudio A

Accidentes Finales	LOC	Depósito de butano					Depósito de propano				
		P1	P2	P3	P4	Frecuencia del Accidente ACR (año ⁻¹)	P1	P2	P3	P4	Frecuencia del Accidente ACR (año ⁻¹)
Incendio de charco	G1a	0,7	0,3	0,7	0,4	$7,54 \cdot 10^{-7}$	0,7	0,3	0,7	0,4	$7,54 \cdot 10^{-7}$
Llamarada						$1,80 \cdot 10^{-7}$					$1,80 \cdot 10^{-7}$
Deflagración de nube inflamable						$1,20 \cdot 10^{-7}$					$1,20 \cdot 10^{-7}$
BLEVE						$4,90 \cdot 10^{-7}$					$4,90 \cdot 10^{-7}$
Dardo de fuego						-					-
Incendio de charco	G2a	0,7	0,3	NP	0,4	$6,50 \cdot 10^{-7}$	0,5	0,5	NP	0,4	$7,54 \cdot 10^{-7}$
Llamarada						$6,50 \cdot 10^{-7}$					$5,4 \cdot 10^{-8}$
Deflagración de nube inflamable						$1,00 \cdot 10^{-7}$					$3,6 \cdot 10^{-8}$
BLEVE						-					-
Dardo de fuego						$5 \cdot 10^{-7}$					$7,00 \cdot 10^{-7}$
Incendio de charco	G3a	0,2	0,8	NP	NP	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,2	0,8	NP	NP	$1,68 \cdot 10^{-5}$
Llamarada						$1,28 \cdot 10^{-5}$					$1,28 \cdot 10^{-5}$
Deflagración de nube inflamable						-					-
BLEVE						-					-
Dardo de fuego						$4 \cdot 10^{-6}$					$4,00 \cdot 10^{-6}$

Tal como se ha mencionado anteriormente, los valores de los modificadores obtenidos para este caso de estudio son de 1,41 y 1,37, estos valores son los que alteran a la frecuencia directamente. Por lo tanto, los valores de las frecuencias finales de los accidentes teniendo en cuenta el factor humano y las dos metodologías empleadas se muestran en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3. Frecuencias de accidente modificadas para el caso de estudio A

Equipo	LOC	Accidente final	Frecuencia ACR (año ⁻¹)	M. difuso	F. final difusas (año ⁻¹)	M. MC	F. finales MC (año ⁻¹)
Depósito de butano	G1a	Incendio de charco	$7,54 \cdot 10^{-7}$	1.41	$1,06 \cdot 10^{-6}$	1.37	$1,04 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$1,80 \cdot 10^{-7}$		$2,54 \cdot 10^{-7}$		$2,48 \cdot 10^{-7}$
		Deflagración de nube inflamable	$1,20 \cdot 10^{-7}$		$1,69 \cdot 10^{-7}$		$1,65 \cdot 10^{-7}$
		BLEVE	$4,90 \cdot 10^{-7}$		$6,91 \cdot 10^{-7}$		$6,74 \cdot 10^{-7}$
		Dardo de fuego	-		-		-
	G2a	Incendio de charco	$7,54 \cdot 10^{-7}$		$1,07 \cdot 10^{-6}$		$1,04 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$5,4 \cdot 10^{-8}$		$7,62 \cdot 10^{-8}$		$7,43 \cdot 10^{-8}$
		Deflagración de nube inflamable	$3,6 \cdot 10^{-8}$		$5,07 \cdot 10^{-8}$		$4,95 \cdot 10^{-8}$
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$7,00 \cdot 10^{-7}$		$9,87 \cdot 10^{-7}$		$9,63 \cdot 10^{-7}$
	G3a	Incendio de charco	$1,68 \cdot 10^{-5}$		$2,37 \cdot 10^{-5}$		$2,31 \cdot 10^{-5}$
		Llamarada	$1,28 \cdot 10^{-5}$		$1,81 \cdot 10^{-5}$		$1,76 \cdot 10^{-5}$
		Deflagración de nube inflamable	-		-		-
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$4,00 \cdot 10^{-6}$		$5,64 \cdot 10^{-6}$		$5,50 \cdot 10^{-6}$
Depósito de propano	G1a	Incendio de charco	$7,54 \cdot 10^{-7}$	1.41	$1,07 \cdot 10^{-6}$	1.37	$1,04 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$1,80 \cdot 10^{-7}$		$2,54 \cdot 10^{-7}$		$2,48 \cdot 10^{-7}$
		Deflagración de nube inflamable	$1,20 \cdot 10^{-7}$		$1,69 \cdot 10^{-7}$		$1,65 \cdot 10^{-7}$
		BLEVE	$4,90 \cdot 10^{-7}$		$6,91 \cdot 10^{-7}$		$6,74 \cdot 10^{-7}$
		Dardo de fuego	-		-		-
	G2a	Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$9,17 \cdot 10^{-7}$		$8,94 \cdot 10^{-7}$
		Llamarada	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$9,17 \cdot 10^{-7}$		$8,94 \cdot 10^{-7}$
		Deflagración de nube inflamable	$1,00 \cdot 10^{-7}$		$1,41 \cdot 10^{-7}$		$1,38 \cdot 10^{-7}$
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$5 \cdot 10^{-7}$		$7,05 \cdot 10^{-7}$		$6,88 \cdot 10^{-7}$
	G3a	Incendio de charco	$1,68 \cdot 10^{-5}$		$2,37 \cdot 10^{-5}$		$2,31 \cdot 10^{-5}$
		Llamarada	$1,28 \cdot 10^{-5}$		$1,81 \cdot 10^{-5}$		$1,76 \cdot 10^{-5}$
		Deflagración de nube inflamable	-		-		-
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$4 \cdot 10^{-6}$		$5,64 \cdot 10^{-6}$		$5,50 \cdot 10^{-6}$

En esta tabla se puede observar la diferencia entre los valores de las frecuencias finales que no tienen en cuenta el factor humano (las que se utilizan usualmente en un ACR) y los valores de las frecuencias modificadas teniendo en cuenta el factor humano, tanto por la

metodología de la lógica difusa como por la simulación mediante Monte Carlo. Como se puede ver en la tabla, los valores de las frecuencias modificadas son más conservadores, ya que son más elevados al considerar el efecto del factor humano. Como era de prever, ya que los valores de los modificadores son parecidos, la diferencia de los valores de frecuencia usando cualquiera de los modificadores obtenidos es muy pequeña.

8.2.2 Caso de estudio B

Tal como se ha mencionado en la sección 8.2, todos los casos se han basado en los mismos sucesos de pérdida de contención con el fin de hacerlos comparables. En este caso B, se trata de un tanque de almacenamiento de GLP y un tanque de almacenamiento de etileno criogénico. En la Tabla 8.4 se encuentra la frecuencia inicial obtenida de la tabla 13 del BEVI para escenarios de almacenamiento de tanques presurizados no enterrados (BEVI, 2009) para las mismas situaciones que en el caso de estudio A (los más comunes). También se muestra la frecuencia corregida teniendo en cuenta la consideración del efecto dominó que también se contempla en este caso de estudio.

Tabla 8.4. Frecuencia inicial y corregida para cada los LOC del caso de estudio B

Código	Evento de pérdida de contención (LOC)	Frecuencia inicial	Frecuencia corregida
G1b	Liberación instantánea de todo el contenido	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
G2b	Liberación de todo el contenido en 10 minutos a corriente continua y constante	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
G3b	Liberación continua de todo el contenido desde un orificio con un diámetro efectivo de 10 mm	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

Al ser los mismos sucesos de pérdida de contención que en el caso de estudio A, se han utilizado los mismos árboles de las Figuras 8.1 y 8.2 de la sección 8.2.1. Igual que en el caso A, con los datos probabilísticos obtenidos de estos árboles de sucesos, se han calculado las frecuencias finales que se utilizan usualmente en un ACR, que se muestran en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5. Frecuencias de accidentes para un ACR normal del caso de estudio B

Accidentes Finales	LOC	Tanque de almacenamiento de LPG					Tanque de almacenamiento de etileno criogénico				
		P1	P2	P3	P4	Frecuencia Accidente (año ⁻¹)	P1	P2	P3	P4	Frecuencia Accidente (año ⁻¹)
Incendio de charco	G1b	0,7	0,3	0,7	0,4	7,90·10 ⁻⁷	0,7	0,3	0,7	0,4	7,90·10 ⁻⁷
Llamarada						1,80·10 ⁻⁷					1,80·10 ⁻⁷
Deflagración de nube inflamable						1,20·10 ⁻⁷					1,20·10 ⁻⁷
BLEVE						4,90·10 ⁻⁷					4,90·10 ⁻⁷
Dardo de fuego						-					-
Incendio de charco	G2b	0,5	0,3	NP	0,4	6,50·10 ⁻⁷	0,5	0,3	NP	0,4	6,50·10 ⁻⁷
Llamarada						9,00·10 ⁻⁸					9,00·10 ⁻⁸
Deflagración de nube inflamable						6,00·10 ⁻⁸					6,00·10 ⁻⁸
BLEVE						-					-
Dardo de fuego						5,00·10 ⁻⁷					5·10 ⁻⁷
Incendio de charco	G3b	0,2	0,3	NP	NP	8,80·10 ⁻⁶	0,2	0,3	NP	NP	8,80·10 ⁻⁶
Llamarada						4,80·10 ⁻⁶					4,80·10 ⁻⁶
Deflagración de nube inflamable						-					-
BLEVE						-					-
Dardo de fuego						4,00·10 ⁻⁶					4,00·10 ⁻⁶

El valor de los modificadores obtenidos para este caso de estudio son de 1,16 y 1,07, tal y como se muestra en la Tabla 8.6. Estos valores se han aplicado a los valores de frecuencia previamente obtenidos resultando los nuevos valores de frecuencias finales de los accidentes que se muestran en la tabla antedicha.

Tabla 8.6. Frecuencias de accidente modificadas para el caso de estudio B

Equipo	LOC	Accidente final	Frecuencia ACR (año ⁻¹)	M. difuso	F. finales difusas (año ⁻¹)	M. MC	F. finales MC (año ⁻¹)
Tanque de LPG	G1b	Incendio de charco	$7,90 \cdot 10^{-7}$	1.16	$9,16 \cdot 10^{-7}$	1.07	$8,48 \cdot 10^{-7}$
		Llamarada	$1,80 \cdot 10^{-7}$		$2,09 \cdot 10^{-7}$		$1,93 \cdot 10^{-7}$
		Deflagración de nube inflamable	$1,20 \cdot 10^{-7}$		$1,39 \cdot 10^{-7}$		$1,29 \cdot 10^{-7}$
		BLEVE	$4,90 \cdot 10^{-7}$		$5,69 \cdot 10^{-7}$		$5,26 \cdot 10^{-7}$
		Dardo de fuego	-		-		-
	G2b	Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$7,55 \cdot 10^{-7}$		$6,98 \cdot 10^{-7}$
		Llamarada	$9,00 \cdot 10^{-8}$		$1,05 \cdot 10^{-7}$		$9,67 \cdot 10^{-8}$
		Deflagración de nube inflamable	$6,00 \cdot 10^{-8}$		$6,96 \cdot 10^{-8}$		$6,44 \cdot 10^{-8}$
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$5,00 \cdot 10^{-7}$		$5,80 \cdot 10^{-7}$		$5,37 \cdot 10^{-7}$
	G3b	Incendio de charco	$8,80 \cdot 10^{-6}$		$1,02 \cdot 10^{-5}$		$9,45 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$4,80 \cdot 10^{-6}$		$5,57 \cdot 10^{-6}$		$5,16 \cdot 10^{-6}$
		Deflagración de nube inflamable	-		-		-
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$4,00 \cdot 10^{-6}$		$4,64 \cdot 10^{-6}$		$4,30 \cdot 10^{-6}$
Tanque de etileno criogénico	G1b	Incendio de charco	$7,54 \cdot 10^{-7}$	1,16	$9,17 \cdot 10^{-7}$	1.07	$8,48 \cdot 10^{-7}$
		Llamarada	$1,80 \cdot 10^{-7}$		$2,09 \cdot 10^{-7}$		$1,93 \cdot 10^{-7}$
		Deflagración de nube inflamable	$1,20 \cdot 10^{-7}$		$1,39 \cdot 10^{-7}$		$1,29 \cdot 10^{-7}$
		BLEVE	$4,90 \cdot 10^{-7}$		$5,69 \cdot 10^{-7}$		$5,26 \cdot 10^{-7}$
		Dardo de fuego	-		-		-
	G2b	Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$7,55 \cdot 10^{-7}$		$6,98 \cdot 10^{-7}$
		Llamarada	$1,00 \cdot 10^{-7}$		$1,05 \cdot 10^{-7}$		$9,67 \cdot 10^{-8}$
		Deflagración de nube inflamable	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$6,96 \cdot 10^{-8}$		$6,44 \cdot 10^{-8}$
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$5 \cdot 10^{-7}$		$5,80 \cdot 10^{-7}$		$5,37 \cdot 10^{-7}$
	G3b	Incendio de charco	$8,80 \cdot 10^{-6}$		$1,02 \cdot 10^{-5}$		$9,45 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$4,80 \cdot 10^{-6}$		$5,57 \cdot 10^{-6}$		$5,16 \cdot 10^{-6}$
		Deflagración de nube inflamable	-		-		-
		BLEVE	-		-		-
		Dardo de fuego	$4 \cdot 10^{-6}$		$4,64 \cdot 10^{-6}$		$4,30 \cdot 10^{-6}$

Se puede apreciar que la diferencia entre los valores de la frecuencia sin considerar el factor humano (frecuencia ACR) y los nuevos valores obtenidos no es excesiva, esto era de esperar debido a que, en este caso, el valor de los modificadores de frecuencia no son

elevados, ya que el factor humano tiene menos afectación por las buenas características y condiciones de la empresa analizada. Sin embargo, comparando los valores de las frecuencias entre el modificador difuso y el obtenido mediante simulación de Monte Carlo se observa que, en este caso la diferencia es mayor que para el caso de estudio A, debido a que el valor de sus modificadores tiene una magnitud parecida pero no tan cercana como en el caso anterior.

8.2.3 Caso de estudio C

A diferencia de los casos anteriores, en este caso de estudio se consideran dos zonas de almacenaje: almacenamiento de formol y almacenamiento de ácido acético. Por ello, dichas zonas aparecen separadas en la Tabla 8.7. En esta tabla se encuentra la frecuencia inicial obtenida de la tabla 17 del BEVI para escenarios para tanques de almacenamiento atmosféricos de contención simple (BEVI, 2009), para las tres situaciones más comunes de una pérdida de contención. También se encuentra la frecuencia corregida teniendo en cuenta que en el almacenamiento de formol hay 4 tanques y que en el caso del almacenamiento de ácido acético hay 2. Además, se considera la afectación del efecto dominó que también está presente en este caso de estudio.

Tabla 8.7. Frecuencia inicial y corregida para cada evento de pérdida de contención

LOC	Evento de pérdida de contención (LOC)	Zona de almacenaje de formol		Zona de almacenaje de ácido acético	
		Frecuencia inicial	Frecuencia corregida	Frecuencia inicial	Frecuencia corregida
G1c	Liberación instantánea de todo el contenido	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
G2c	Liberación de todo el contenido en 10 minutos a corriente continua y constante	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
G3c	Liberación continua de todo el contenido desde un orificio con un diámetro efectivo de 10 mm	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$

Resultados y discusión

En el caso de las disoluciones de formol, debido a que la evolución de este tipo de fugas es la dispersión tóxica a la atmosfera, sólo se plantea un escenario accidental relacionado con la dispersión de la nube, por este motivo, no se presenta árbol de sucesos para este tipo de fuga. En cambio, para poder obtener las frecuencias finales relacionadas con el tanque de ácido acético se ha utilizado el árbol de sucesos de la Figura 8.3 (BEVI, 2009).

Suceso iniciador	Ignición Inmediata	Ignición Retardada	Deflagración de nube inflamable	Consecuencias
------------------	--------------------	--------------------	---------------------------------	---------------

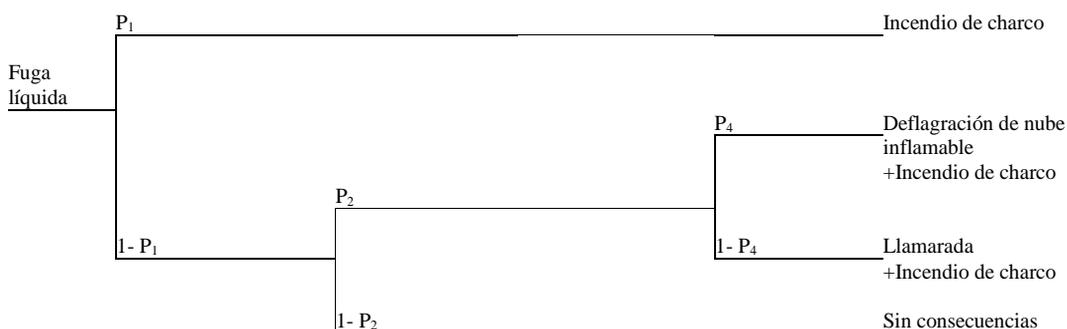


Figura 8.3. Árbol de sucesos para fuga de sustancias líquidas inflamables

Con los datos probabilísticos obtenidos de este árbol se han calculado las frecuencias que se utilizan en un ACR normalmente, las cuales se muestran en la Tabla 8.8.

Tabla 8.8. Frecuencias de accidentes para un ACR normal del caso de estudio C

Equipo	LOC	P1	P2	P3	P4	Accidentes finales	Frecuencia del accidente (año ⁻¹)
Tanque de almacenaje de formol	G1c	-	-	-	-	Dispersión tóxica	$2,00 \cdot 10^{-5}$
	G2c					Dispersión tóxica	$2,00 \cdot 10^{-5}$
	G3c					Dispersión tóxica	$4,00 \cdot 10^{-4}$
Tanque de almacenaje de ácido acético	G1c	0,01	0,3	-	0	Incendio de charco	$6,14 \cdot 10^{-6}$
						Llamarada	$5,94 \cdot 10^{-6}$
	G2c					Incendio de charco	$6,14 \cdot 10^{-6}$
						Llamarada	$5,94 \cdot 10^{-6}$
	G3c					Incendio de charco	$1,23 \cdot 10^{-4}$
						Llamarada	$1,19 \cdot 10^{-4}$

Los valores del modificador difuso y el obtenido mediante simulación de Monte Carlo para este caso de estudio son de 1,37 y de 1,34, respectivamente (sección 7.3.2). Aplicando dichos valores a las frecuencias de la tabla anterior se obtienen las frecuencias modificadas que se muestran en la Tabla 8.9.

Tabla 8.9. Frecuencias de accidentes finales alteradas por el modificador caso de estudio C

Equipo	LOC	Accidente final	F. finales ACR (año ⁻¹)	M. difuso	Frecuencias difusas (año ⁻¹)	M. MC	Frecuencias MC (año ⁻¹)
Tanque de formol	G1c	Dispersión tóxica	$2,00 \cdot 10^{-5}$	1.37	$2,74 \cdot 10^{-5}$	1.34	$2,68 \cdot 10^{-5}$
	G2c	Dispersión tóxica	$2,00 \cdot 10^{-5}$		$2,74 \cdot 10^{-5}$		$2,68 \cdot 10^{-5}$
	G3c	Dispersión tóxica	$4,00 \cdot 10^{-4}$		$5,48 \cdot 10^{-4}$		$5,36 \cdot 10^{-4}$
Tanque de ácido acético	G1c	Incendio de charco	$6,14 \cdot 10^{-6}$	1.37	$8,41 \cdot 10^{-6}$	1.34	$8,23 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$5,94 \cdot 10^{-6}$		$8,14 \cdot 10^{-6}$		$7,96 \cdot 10^{-6}$
	G2c	Incendio de charco	$6,14 \cdot 10^{-6}$		$8,41 \cdot 10^{-6}$		$8,23 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$5,94 \cdot 10^{-6}$		$8,14 \cdot 10^{-6}$		$7,96 \cdot 10^{-6}$
	G3c	Incendio de charco	$1,23 \cdot 10^{-4}$		$1,68 \cdot 10^{-4}$		$1,65 \cdot 10^{-4}$
		Llamarada	$1,19 \cdot 10^{-4}$		$1,63 \cdot 10^{-4}$		$1,59 \cdot 10^{-4}$

Igual que en los primeros dos casos de estudio, se observa diferencia entre los valores de frecuencia obtenidos para un ACR sin tener en cuenta el factor humano y los valores de frecuencia afectados por los modificadores. En este caso, los valores de los modificadores son más parecidos entre ellos por lo que sus valores de frecuencia también lo son.

8.2.4 Caso de estudio D

Como ya se ha comentado en la sección 7.4.2, esta empresa es más grande y cuenta con varias zonas de almacenaje. Como ejemplo de cálculo de las frecuencias de este caso de estudio sólo se muestra una única área almacenamiento de dicha empresa que incluye: 2 zonas de almacenaje de acetona (una de ellas para residuos) y la zona de almacenaje de metanol. No obstante, para el cálculo final del riesgo se tienen en cuenta todas las áreas. En la Tabla 8.10 se indica la frecuencia inicial obtenida de la tabla 17 del BEVI para escenarios

de tanques de almacenamiento atmosféricos de contención simple (BEVI, 2009). Sólo se contemplan dos situaciones de pérdida de contención, ya que la tercera situación G3d, correspondiente a una liberación continua de todo el contenido desde un orificio con un diámetro efectivo de 10 mm, fue descartada de acuerdo con el criterio F1-4 (Instrucción 14/2008 SIE, 2008), en donde se establece que no se debe de considerar el suceso si su afectación no excede los límites de la propiedad en cuestión que es el caso de este iniciador.

En la Tabla 8.10 también se encuentra la frecuencia corregida teniendo en cuenta que en la zona de almacenaje de acetona hay 5 tanques para la zona 1 y 2 tanques para la zona de residuos. En todas las zonas se considera el efecto dominó.

Tabla 8.10. Frecuencia inicial y corregida para cada evento de pérdida de contención

LOC	Evento de pérdida de contención (LOC)	Zona de almacenaje de acetona		Zona de almacenaje de metanol		Zona de almacenaje residual de acetona	
		Frec. inicial	Frec. corregida	Frec. inicial	Frec. corregida	Frec. inicial	Frec. corregida
G1d	Liberación instantánea de todo el contenido	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
G2d	Liberación de todo el contenido en 10 minutos a corriente continua y constante	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$

Para la obtención de los datos probabilísticos en el caso de los tanques de acetona se ha empleado el árbol de sucesos de la Figura 8.3 utilizada previamente para el caso de estudio C Para la zona de almacenaje de metanol se ha utilizado el árbol de sucesos que se muestra en la Figura 8.4.

Resultados y discusión

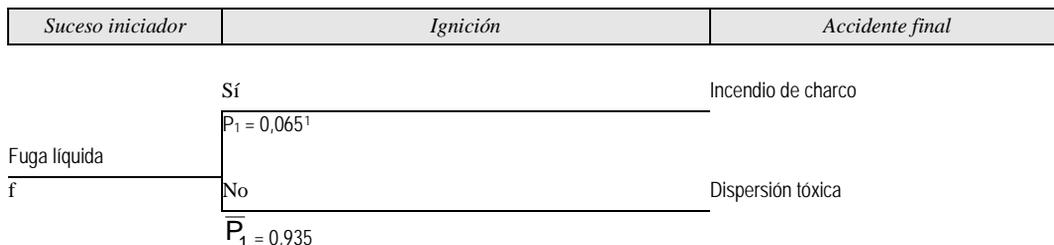


Figura 8.4. Árbol de sucesos para fugas de sustancias y mezclas líquidas inflamables y tóxicas

Con los datos que se obtuvieron de estos árboles se han calculado las frecuencias que son las que se utilizan usualmente en un ACR. Éstas se encuentran en la Tabla 8.11. Como ya se ha comentado, aquí sólo se han presentado los resultados de frecuencia para esta zona de almacenaje específica. El resto de las frecuencias para los demás escenarios de este caso de estudio se encuentran en el anexo L. Sin embargo, aunque no se muestren en esta sección todas las frecuencias de todos los escenarios de este caso de estudio, éstas se han tenido en cuenta para el cálculo del riesgo asociado al mismo.

Tabla 8.11. Frecuencias de accidentes para un ACR normal del caso de estudio B

Zona	LOC	P1	P2	P3	P4	Tipo de accidente final	Frec. Accidente Final (año ⁻¹)
Zona de almacenaje de acetona	G1d	0,065	0,3	-	0	Llamarada	$1,40 \cdot 10^{-5}$
						Incendio de charco	$1,73 \cdot 10^{-5}$
	G2d					Llamarada	$1,40 \cdot 10^{-5}$
						Incendio de charco	$1,73 \cdot 10^{-5}$
Zona de almacenaje de metanol	G1d	0,065	-	-	-	Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$
						Dispersión tóxica	$9,35 \cdot 10^{-6}$
	G2d					Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$
						Dispersión tóxica	$9,35 \cdot 10^{-6}$
Zona de almacenaje residual de acetona	G1d	0,065	0,3	-	0	Llamarada	$5,61 \cdot 10^{-6}$
						Incendio de charco	$6,91 \cdot 10^{-6}$
	G2d					Llamarada	$5,61 \cdot 10^{-6}$
						Incendio de charco	$6,91 \cdot 10^{-6}$

Los valores de los modificadores de la frecuencia obtenidos para este caso de estudio son de 1,22 y 1,13 (sección 7.3.2). En la Tabla 8.12 se muestran los valores modificados de la frecuencia de los sucesos escogidos como ejemplo. Las demás frecuencias calculadas para los demás escenarios de este caso de estudio se encuentran en el anexo L.

Tabla 8.12. Frecuencias de los accidentes finales alteradas por el modificador

Equipo	LOC	Accidente final	F. finales ACR (año ⁻¹)	Modificador difuso	Frecuencias difusas (año ⁻¹)	Modificador MC	Frecuencias MC (año ⁻¹)
Zona de almacenaje de acetona	G1d	Llamarada	$1,40 \cdot 10^{-5}$	1,22	$1,70 \cdot 10^{-5}$	1,13	$1,59 \cdot 10^{-5}$
		Incendio de charco	$1,73 \cdot 10^{-5}$		$2,11 \cdot 10^{-5}$		$1,96 \cdot 10^{-5}$
	G2d	Llamarada	$1,40 \cdot 10^{-5}$		$1,70 \cdot 10^{-5}$		$1,59 \cdot 10^{-5}$
		Incendio de charco	$1,73 \cdot 10^{-5}$		$2,11 \cdot 10^{-5}$		$1,96 \cdot 10^{-5}$
Zona de almacenaje de metanol	G1d	Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$	1,22	$7,94 \cdot 10^{-7}$	1,13	$7,36 \cdot 10^{-7}$
		Dispersión tóxica	$9,35 \cdot 10^{-6}$		$1,32 \cdot 10^{-5}$		$1,06 \cdot 10^{-5}$
	G2d	Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$7,94 \cdot 10^{-7}$		$7,36 \cdot 10^{-7}$
		Dispersión tóxica	$9,35 \cdot 10^{-6}$		$1,32 \cdot 10^{-5}$		$1,06 \cdot 10^{-5}$
Zona de almacenaje residual de acetona	G1d	Llamarada	$5,61 \cdot 10^{-6}$	1,22	$6,85 \cdot 10^{-6}$	1,13	$6,36 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$6,91 \cdot 10^{-6}$		$8,43 \cdot 10^{-6}$		$7,83 \cdot 10^{-6}$
	G2d	Llamarada	$5,61 \cdot 10^{-6}$		$6,85 \cdot 10^{-6}$		$6,36 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$6,91 \cdot 10^{-6}$		$8,43 \cdot 10^{-6}$		$7,83 \cdot 10^{-6}$

Igual que en los casos de estudio anteriores, se puede apreciar el cambio de la frecuencia final usando los modificadores. Como el modificador difuso es mayor, esto implica frecuencias más elevadas que para el caso de Monte Carlo y ACR.

A continuación, se muestra el cálculo de las consecuencias de los accidentes para cada uno de los casos de estudio.

8.3 Cálculo de las consecuencias

Como se explicó en el capítulo I, además de las frecuencias, la obtención de las consecuencias de los accidentes es también una parte vital del ACR, y necesaria para poder representar el riesgo gráficamente. Aunque esta tesis no se enfoca en la estimación de las consecuencias de los accidentes, si se menciona como se han obtenido. El objetivo de determinar los efectos de las consecuencias es el de establecer los alcances letales asociados a diferentes fenómenos físicos causados por los accidentes, como la sobrepresión o la radiación térmica. Estos alcances están relacionados con los umbrales correspondientes al 100%, 50% y 1% de letalidad que se derivan de un análisis “probit”. Estos criterios de áreas letales están basados en la Fase 4 de “Criterios complementarios: Cálculo de las consecuencias letales” de la Instrucción 14/2008 SIE.

Por lo tanto, se han estimado los efectos, que generan daño sobre las personas, de los accidentes finales asociados a los iniciadores considerados en la sección anterior. Para obtener los resultados, se han utilizado modelos de cálculo de consecuencias contenidos en los softwares EFFECTS 8.1.6 (TNO, 2012a) y ALOHA (*Area of Location Hazards Atmosphere*) del U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 2007). A continuación, se presentan los cálculos de las consecuencias de los accidentes de los cuatro casos de estudio propuestos.

8.3.1 Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio A

Como se mencionó en la descripción de este caso de estudio, esta empresa cuenta con dos tanques de almacenamiento, uno de butano y otro de propano. En la Tabla 8.13 se muestran los cálculos de las consecuencias obtenidos para el tanque de almacenamiento de butano en un caso de liberación instantánea de todo el contenido (LOC: G1a). Dentro de esta tabla se pueden observar las características del tanque, los datos del escenario de la fuga y, en la parte inferior, las áreas letales de todos los accidentes causados por este iniciador (p.e. incendio, llamarada), calculado por los softwares previamente mencionados. El resto de los

cálculos de las consecuencias para los demás escenarios considerados para este tanque y del tanque de propano se encuentran en el anexo L. Cabe decir que aunque no se hayan incluido todos los resultados de consecuencias en esta sección, estos sí se han tenido presentes para el cálculo del riesgo de la instalación.

Tabla 8.13. Cálculos de la magnitud de las consecuencias del tanque de butano en caso de una liberación instantánea de todo el contenido

LOC	Datos del tanque	
G1a	Capacidad de operación normal del tanque (kg): 62.668 (50% del Volumen en útil) Cantidad liberada (kg): 62.668	
	ACCIDENTE	ÁREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 39 Alcance LC50 (m): 58 Alcance LC1 (m): 76
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/5 (m): 340 Semi anchura de la pluma D/5 (m): 120
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 387 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 260
	Explosión	Alcance LC100 D/5 (m): 75
		Alcance LC100 F/1,7 (m): 74
	Bola de fuego	Alcance LC100 (m): 182 Alcance LC50 (m): 240 Alcance LC1 (m): 375

8.3.2 Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio B

Como ya se ha indicado en apartados anteriores, la empresa representada para este caso de estudio B cuenta con un tanque de almacenamiento de GLP y un tanque de etileno criogénico. De igual manera que en el caso de estudio A, se muestra un ejemplo de los cálculos de las consecuencias de los accidentes considerados para el tanque de etileno criogénico y el iniciador de liberación instantánea de todo el contenido (G1b) (Tabla 8.14). Los cálculos de las consecuencias para los demás escenarios del tanque de etileno y del tanque de GLP se encuentran en el anexo L.

Tabla 8.14. Cálculos de las consecuencias del tanque de almacenamiento de etileno criogénico en caso de una liberación instantánea de todo el contenido

LOC	Datos del tanque	
G1b	<u>Producto:</u> R-152a (1,1-Difluoroetano) <u>Cantidad máximo del tanque (kg):</u> 46.300 <u>Capacidad de operación normal del tanque:</u> 85% de la capacidad <u>Temperatura de almacenaje (°C):</u> 13,4 <u>Presión de almacenaje (bar):</u> 4,17 (Presión de vapor a temperatura ambiente) <u>Características del tanque:</u> - Diámetro: 2,42 m - Longitud: 12 m - Volumen útil: 59 m ³ . Superficie del derrame (m ²): 1.500 Radio del derrame: 21,9 m	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 22 Alcance LC50 (m): 25 Alcance LC1 (m): 41
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/4,8 (m): 180
		Semi anchura de la pluma D/4,8 (m): 71 Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 242 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 230
	Explosión (UVCE)	Alcance LC100 D/4,8 (m): 52
Alcance LC100 F/1,7 (m): 56		
BLEVE	Masa involucrada (kg): 46.300 Alcance LC100 (m): 106 Alcance LC50 (m): 106 Alcance LC1 (m): 191	

8.3.3 Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio C

Como se ha descrito anteriormente, esta empresa cuenta con dos zonas de almacenaje de productos, una de formol y otra de ácido acético que contienen varios tanques. En la Tabla 8.15 se muestran los cálculos de las consecuencias obtenidos para el tanque de almacenamiento de formol y el iniciador de liberación instantánea de todo el contenido (G1c). En este caso, se puede observar que solamente se calculan las áreas letales de una dispersión tóxica, debido a que es el único accidente para este tipo de sustancias. El resto de los cálculos de las consecuencias para los demás escenarios y tanques se encuentran en el anexo L.

Tabla 8.15. Cálculos de la magnitud de las consecuencias del tanque de almacenamiento de formol en caso de una liberación instantánea de todo el contenido

LOC	Datos del tanque	
G1c	<u>Producto:</u> Formol <u>Condiciones de almacenaje:</u> - Temperatura (°C): ambiente - Presión (bar abs.): atmosférica <u>Dimensiones del depósito:</u> - Diámetro (m): 2,9 - Altura (m): 4,85 - Volumen (m ³): 30 (70% ple) <u>Dimensiones de la cubeta de retención:</u> - Superficie total (m ²): 211 - Superficie útil (m ²): 158,2 - Altura (cm): 60	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Dispersión tóxica	<u>Meteorología D/4,8</u> Alcance LC99 (L/A) (m): 8/3 Alcance LC50 (L/A) (m): 15/5 Alcance LC1 (L/A) (m): 27/9
		<u>Meteorología F/1,5</u> Alcance LC99 (L/A) (m): 28/5 Alcance LC50 (L/A) (m): 51/9 Alcance LC1 (L/A) (m): 92/16

8.3.4 Cálculo de las consecuencias para el caso de estudio D

Como ya se ha expuesto, este caso de estudio cuenta con muchas zonas de almacenaje, por ello y, como para el análisis de las frecuencias, para reducir la extensión de la memoria de esta tesis sólo se muestra un ejemplo de cálculo de consecuencias. En la Tabla 8.16 pueden verse los cálculos de de las consecuencias obtenidos para la zona de almacenaje de metanol y el iniciador de liberación instantánea de todo el contenido (G1d). El resto de los cálculos de las consecuencias para los demás escenarios y zonas de almacenamiento se encuentran en el anexo L.

Tabla 8.16. Cálculos de la magnitud de las consecuencias para la zona de almacenaje metanol en caso de una liberación instantánea de todo el contenido

LOC	Datos del tanque	
G1d	<u>Producto:</u> metanol <u>Temperatura de almacenaje (°C):</u> 14,3 <u>Presión de almacenaje (bar abs.):</u> atmosférica <u>Características del tanque:</u> - Longitud (m): 4 - Volumen (m ³): 38	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 9,4 Alcance LC50 (m): 10,2 Alcance LC1 (m): 15,2
	Dispersion tóxica.	<u>Meteorología 4,8D</u> Alcance LC99 (m): 10/1 Alcance LC50 (m): 10/1 Alcance LC1 (m): 10/1
<u>Meteorología 1,5F</u> Alcance LC99 (m): 10/1 Alcance LC50 (m): 14/1 Alcance LC1 (m): 25/1		

Una vez obtenidas las consecuencias para todos los casos de estudio junto con las frecuencias de los accidentes finales que se han obtenido en la sección 8.2, se procede a hacer la representación gráfica del riesgo, la cual se explica a continuación.

8.4 Representación gráfica del riesgo

Como se explicó en el capítulo I, una vez obtenidas todas las frecuencia de los accidentes finales y las consecuencias letales de todos los accidentes, se puede calcular el riesgo individual, éste nos proporciona el valor del riesgo para una cierta localización o persona alrededor de una industria. Este riesgo individual está gráficamente caracterizado por la presencia de curvas de isoriesgo, las cuales han sido calculadas utilizando el programa RISKCURVES 7.6 (TNO, 2012b).

En las figuras presentadas a continuación, se muestra la representación gráfica del riesgo individual para cada uno de los casos de estudio. Se debe recordar que para estos cálculos se ha tenido en cuenta todos los escenarios accidentales aunque luego se hayan sólo presentado

ejemplos en las demás secciones. En todas las gráficas se muestra, delineado en negro y al centro de la figura los límites del establecimiento, así como también diferentes curvas de isoriesgo obtenidas. Tal como se mencionó en la sección I existen diferentes curvas de isoriesgo en donde se representa el riesgo de que un individuo esté expuesto a un accidente fatal cada cierta cantidad de tiempo, medida en años. Por ejemplo: la curva cada 10^{-6} año⁻¹ traza el alcance en el cual una persona ajena a la planta sufriría una fatalidad cada 10^{-6} años. Esta curva también marca el criterio de aceptabilidad de las curvas de isoriesgo según el “*Purple Book*” (Instrucción 14/2008 SIE, 2008). A continuación, se presentan las curvas calculadas para los cuatro casos de estudio.

8.4.1 Representación del riesgo individual del caso de estudio A

En la Figura 8.5 se muestran tres tipos diferentes de curvas: las líneas continuas son las curvas de isoriesgo obtenidas en un ACR sin tener en cuenta los modificadores debidos al factor humano; las líneas discontinuas de guiones representan las curvas teniendo en cuenta el modificador difuso de la frecuencia, mientras que las líneas discontinuas de puntos son las curvas obtenidas usando el modificador basado en la simulación de Monte Carlo. Los colores de las curvas indican que tipo de isocurva es: 10^{-5} año⁻¹ en azul y 10^{-6} año⁻¹ en rojo.

Como puede verse, la diferencia entre las curvas que tienen en cuenta el efecto del factor humano determinado por cualquiera de las dos metodologías, (representadas por líneas discontinuas de guiones y puntos) es prácticamente nula. Sin embargo, y como era de esperar, se aprecia diferencia, para este ultimo caso, entre las curvas obtenidas para el ACR sin tener en cuenta el factor humano y las calculadas usando los modificadores, con un aumento en la distancia de afectación.



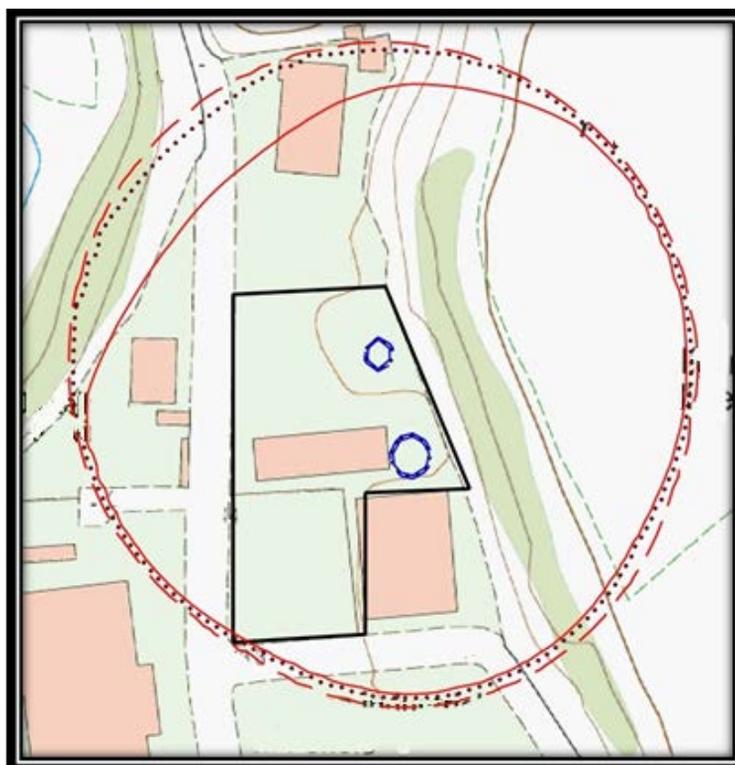
CASO DE ESTUDIO A							
Curvas de isorriesgo	10^{-5} año^{-1}	ACR		Modificador difuso		Modificador MC	
	10^{-6} año^{-1}						

Figura 8.5. Curvas de iso-riesgo con y sin modificadores para el caso de estudio A

En este caso de estudio, en el que por sus condiciones y características el efecto del factor humano es elevado, se observa un cambio considerable en sus curvas de isorriesgo respecto a las del ACR que no considera dicho efecto. Las curvas de isorriesgo de 10^{-5} año^{-1} , representadas en color azul, no sobresalen de los límites del establecimiento, aun teniendo en cuenta la afectación del factor humano; a pesar de ello, el alcance de la curva afectada por dicho factor es mayor. Con respecto a las curvas de isorriesgo de 10^{-6} año^{-1} , representadas en color rojo, se presenta una situación similar. Las nuevas curvas de isorriesgo afectadas por los modificadores y representadas por las líneas discontinuas aumentan su alcance de forma notable.

8.4.2 Representación del riesgo individual del caso de estudio B

De igual manera que en el caso anterior A, se obtuvieron las diferentes curvas de isorriesgo que representan el riesgo individual (Figura 8.6). La representación de las curvas es igual que en la sección anterior: las líneas continuas son las obtenidas para el ACR sin tener en cuenta el factor humano y las discontinuas son las obtenidas considerando el mencionado factor.



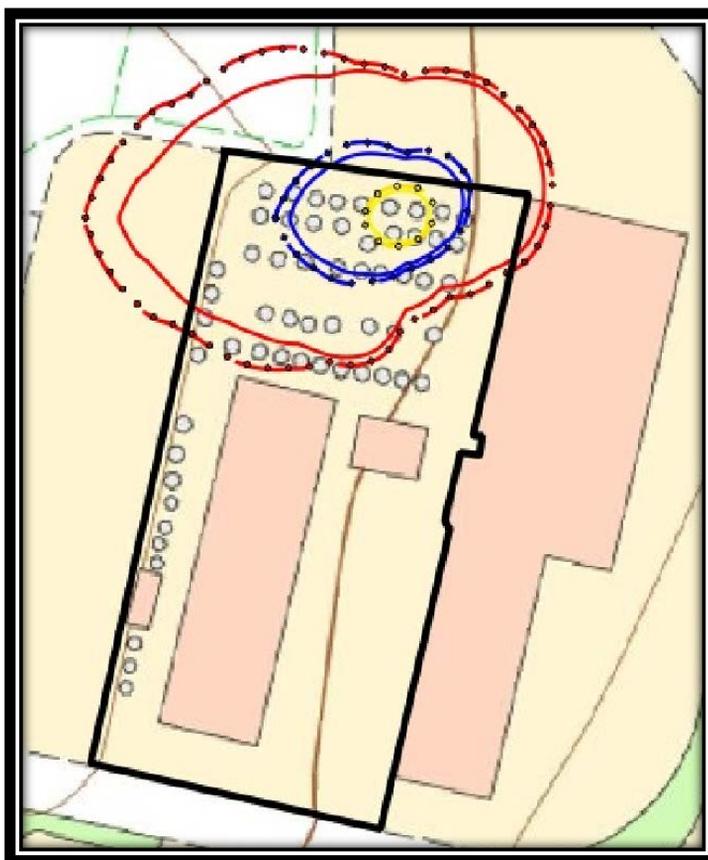
CASO DE ESTUDIO B							
Curvas de isorriesgo	10^{-5} año^{-1}	ACR	—	Modificador difuso	—	Modificador MC	—
	10^{-6} año^{-1}		—		—		—

Figura 8.6. Curvas de iso-riesgo con y sin modificadores para el caso de estudio B

Al contrario del caso de estudio anterior, la empresa considerada para este caso tiene unas condiciones y características que implican una baja afectación del factor humano en su funcionamiento. Por ello, en la representación gráfica del riesgo individual mostrada en la Figura 8.6, se puede observar que las nuevas curvas de isoriesgo de 10^{-5} año⁻¹ afectadas por los modificadores (representadas en color azul) son prácticamente iguales comparadas con las obtenidas para el ACR. La diferencia entre éstas es mínima, por lo que su alcance es casi el mismo. Sin embargo, para las curvas de isoriesgo 10^{-6} año⁻¹, representadas en color rojo, si se nota una diferencia, aunque no tan notable como en el caso de estudio anterior. Dichas nuevas curvas de isoriesgo muestran un aumento en su alcance.

8.4.3 Representación del riesgo individual del caso de estudio C

Como ya se ha detallado en secciones anteriores, este caso de estudio se refiere a una empresa que almacena productos inflamables y tóxicos. En la sección 7.4 se ha mostrado que los valores de los modificadores de la frecuencia para esta empresa eran bastante elevados por sus características y condiciones de trabajo. En la Figura 8.7 se puede observar, al igual que en los casos anteriores, los tres tipos diferentes de curvas que siguen el mismo código que en los casos ya analizados.



		CASO DE ESTUDIO C					
Curvas de isoriesgo	10^{-4} año^{-1}	ACR	—	Modificador difuso	...	Modificador MC	—
	10^{-5} año^{-1}		—		...		—
	10^{-6} año^{-1}		—		...		—

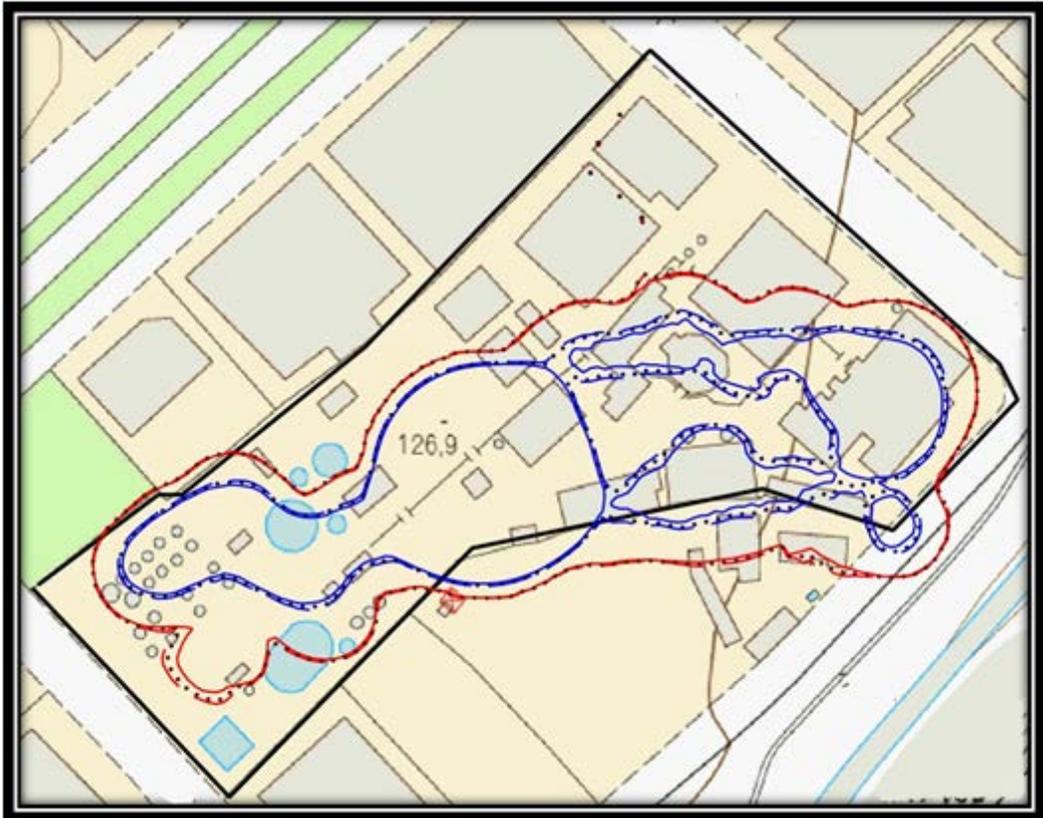
Figura 8.7. Curvas de isoriesgo con y sin modificadores para el caso de estudio C

En dicha figura, como en los demás casos, se observa la diferencia en el alcance entre las curvas de isoriesgo obtenidas para un ACR sin considerar el efecto del factor humano y las curvas obtenidas considerando la influencia de este factor, y como era de prever estas últimas tienen más alcance. Cabe comentar que, en este caso, al haber sustancias tóxicas el

accidente más significativo y con mayor alcance es la dispersión de una nube tóxica, accidente que está altamente influenciado por las condiciones meteorológicas de la zona donde se encuentra el establecimiento a estudio. Por ello las formas de las curvas de isoriesgo son diferentes a los casos A y B, en los cuales el efecto más significativo por los accidentes considerados es la radiación térmica, siendo éste un efecto que, prácticamente, no está afectado por las condiciones meteorológicas y es mucho más simétrico. En lo referente a las curvas de isoriesgo cabe indicar que en las curvas de 10^{-4} año⁻¹, de color amarillo, el efecto del factor humano no es significativo, mientras que en las curvas de 10^{-5} año⁻¹ hay un pequeño incremento en su alcance por dicho factor y en las curvas de isoriesgo de 10^{-6} año⁻¹ el aumento en su alcance es más significativo. También se puede observar que las curvas obtenidas para los dos modificadores son muy similares, como era de esperar por la proximidad de sus valores.

8.4.4 Representación del riesgo individual del caso de estudio D

En la Figura 8.8 se muestran las diferentes curvas encontradas para este caso de estudio, las cuales siguen el mismo código que para los casos anteriores. Como se ha mostrado en la sección 7.4, este caso de estudio presenta una afectación por parte del factor humano que se puede considerar de tipo medio/bajo debido a sus condiciones y características; en consecuencia, tal como se observa en la Figura 8.8, la afectación en las curvas de isoriesgo causadas por dicho factor es mínima, tanto para las curvas de 10^{-5} año⁻¹ como para las curvas de 10^{-6} año⁻¹, que como se puede ver coinciden en su alcance con las curvas obtenidas para el ACR que no tiene en cuenta el mencionado factor.



		CASO DE ESTUDIO D					
Curvas de isorriesgo	10^{-5} año $^{-1}$	ACR	—	Modificador difuso	—	Modificador MC	—
	10^{-6} año $^{-1}$		—		—		—

Figura 8.8. Curvas de iso-riesgo con y sin modificadores para el caso de estudio D

8.5 Discusión de resultados

Después de analizar los resultados presentados, se ha observado que los modificadores tienen mayor influencia en los casos de estudio donde los valores de sus modificadores son más altos (cerca de 1,50), causado por las pobres condiciones de sus factores humanos. Por lo tanto, para las nuevas curvas de isorriesgo obtenidas en los casos de estudio A y C (valores de modificador cerca de 1,50) pude verse un notable incremento en el alcance de

sus curvas comparadas con las obtenidas para un ACR que no tiene en cuenta el factor humano, tanto para la curva de 10^{-5} año⁻¹ como para la de 10^{-6} año⁻¹. Esto demuestra la importancia de incluir el factor humano en el cálculo del riesgo, sobre todo para aquellas empresas que tienen condiciones pobres de dicho factor. Por el contrario, para los casos de estudio B y D, con condiciones de factores humanos en su mayoría excelentes, las diferencias entre sus curvas han sido mucho menores.

Para el primer caso de estudio A, se han obtenido valores de los modificadores “altos”, esto origina que las curvas de isorriesgo, tanto la isocurva de 10^{-5} año⁻¹ como la de 10^{-6} año⁻¹, aumentan visiblemente su alcance. Se ha observado que las curvas de isorriesgo calculadas con los modificadores difusos y mediante Monte Carlo se solapan. Esto es debido, probablemente, al hecho de que los dos valores de los modificadores son muy próximos.

Para el segundo caso de estudio, se han obtenido valores más “bajos” del modificador que en el caso anterior. Las curvas de isorriesgo de 10^{-5} año⁻¹ no han sufrido cambio alguno. Sin embargo, las de 10^{-6} año⁻¹ si han presentado un aumento en su alcance que, aunque no es tan destacable como en el caso de estudio A, si es apreciable, tal como puede verse gráficamente. Al contrario que en el primer caso de estudio, se ha notado una diferencia de alcance entre las curvas de isorriesgo de 10^{-6} año⁻¹ del modificador difuso y las basadas en el modificador de Monte Carlo; esta diferencia se debe, probablemente, a que los valores de sus modificadores no son tan similares como en el caso anterior. Por otro lado, cabe indicar que el modificador de Monte Carlo tiende a ser menos conservador que el de la lógica difusa.

Para el caso de estudio C, igual que la empresa estudiada en el caso de estudio A, los valores son “altos” y se ha observado que, al contrario de los dos primeros casos de estudio, la forma de sus curvas cambian de circular a una forma de óvalo. Esto está ocasionado por las sustancias tóxicas presentes en esa empresa, las cuales generan dispersiones tóxicas. También se ha observado que las nuevas curvas de isorriesgo de 10^{-5} año⁻¹ y 10^{-6} año⁻¹, modificadas por el factor humano, aumentan su alcance al compararlas con las curvas de isorriesgo obtenidas para un ACR no modificado por dicho factor. Cabe destacar que, para los casos A y C, a mayor alcance de las curvas mayor separación entre las curvas obtenidas

para el ACR sin considerar el factor humano y el ACR modificado. Esto se debe al hecho de que al multiplicar algunos iniciadores por su modificador, su riesgo asociado incrementa su orden de magnitud implicando por ello un mayor alcance. Como era de esperar, las curvas modificadas, tanto por el modificador difuso como por el obtenido mediante Monte Carlo, se solapan debido a que los valores de dichos modificadores son más cercanos.

Para el último caso de estudio D, el cual, a diferencia de los casos de estudio anteriores, cuenta con muchos más iniciadores y posibles escenarios accidentales, se observa que sus resultados son parecidos al caso de estudio B, pero en esta ocasión las nuevas curvas de 10^{-5} año⁻¹ y 10^{-6} año⁻¹ se solapan con las curvas de isorriesgo obtenidas para el ACR que no tiene en cuenta el factor humano. Otra cosa que llama la atención es que en comparación con los demás casos de estudio, aunque la diferencia entre sus modificadores es mayor, las nuevas curvas obtenidas con dichos modificadores se solapan y no hay distinción entre ellas. Esto puede ser debido al mayor número de equipos e iniciadores tenidos en cuenta, lo cual puede disminuir el efecto de los modificadores.

En todos los casos de estudio presentados, los valores de los modificadores difusos son más conservadores comparados con los de Monte Carlo, esto se debe a que la lógica difusa tiene en cuenta los solapamientos de los rangos de las variables y en cambio el método de Monte Carlo no, al ser un método numérico y tener rangos estrictos.

Capítulo IX. Conclusiones

En esta tesis, se ha hecho énfasis en la vital importancia del factor humano en el análisis del riesgo. Este factor, como se ha ido mencionando a lo largo de la tesis, ha sido la causa de muchos accidentes graves dentro de la industria química. Es por esto que se ha decidido introducirlo en el análisis de riesgo mediante la creación de un modificador de la frecuencia de los accidentes, utilizando dos metodologías diferentes, las cuales ya han sido utilizadas en algunos casos dentro de este ámbito: la lógica difusa y la simulación de Monte Carlo.

Analizando las diversas fuentes existentes de frecuencia de accidentes se puede ver que existen diferencias entre los valores. Así las frecuencias del BEVI no incluyen de ninguna manera el factor humano; en cambio, hay otras bases de datos, como las del gobierno británico y del Flemish Government, que indican que en los valores de sus frecuencias ya está incluido de alguna forma dicho factor, aunque no especifican de qué manera.

Por ello, se ha diseñado un modificador de la frecuencia de los sucesos iniciadores para que incluya las causas (o factores) principales que tienen influencia sobre el factor humano:

factores organizacionales, factores de las características del trabajo y factores de las características personales. Cada uno de estos factores incluyen variables relacionadas, como por ejemplo, el factor de las características personales incluye: las habilidades y conocimientos del trabajador y su comportamiento personal.

Por ello, se diseñó un modificador para que incluyera los principales factores humanos causantes de accidentes en el cálculo de riesgo: factores organizacionales, factores de las características del trabajo y factores de las características personales. Cada uno de estos factores incluyeron variables relacionadas, como por ejemplo, el factor de las características personales que incluye: Las habilidades y conocimientos del trabajador y su comportamiento personal.

Como se ha comentado, la lógica difusa ha sido una de las metodologías usadas en esta tesis. No es la primera vez que esta metodología sirve como una herramienta útil en el análisis de riesgo. Incluir la experiencia de los expertos es de mucha utilidad para construir modelos como el que aquí se ha planteado, especialmente porque los factores humanos no son una variable fácil de medir. Por ello, se necesitan parámetros cualitativos para su cuantificación. Por lo tanto, la recolección e interpretación de los datos proveídos por los expertos ha sido una parte muy importante en el desarrollo de esta metodología. Debido a que la metodología se basa en la opinión y conocimiento de los expertos, se creó un cuestionario en donde se recolectaron los datos necesarios para poder crear el modelo basado en dicha metodología; 39 expertos internacionales respondieron el cuestionario. De aquí, se han obtenido las reglas difusas y los pesos de las diferentes variables y, según la opinión de los expertos, se ha deducido que las variables del factor organizacional tienen diferente importancia, siendo la formación de los trabajadores la variable con más peso. Para el resto de las variables de los demás factores, los expertos consideraron que tenían la misma importancia.

La otra metodología usada para la obtención del modificador, la cual es una herramienta comúnmente usada en problemas ingenieriles, ha sido la simulación de Monte Carlo. Esta técnica es relativamente sencilla comparada con la lógica difusa y, igual que ésta última,

también ha sido empleada en el análisis del riesgo. Para aplicar esta metodología se han asignado rangos de incertidumbre a cada variable y se ha representado cada una de ellas por una función de distribución de probabilidad.

Cuatro casos de estudio han sido presentados y analizados, representando cada uno de ellos a una empresa química real. Se han analizado dos casos de estudio relacionados con empresas que almacenan y/o procesan productos inflamables y otros dos casos de empresas que manipulan productos inflamables y tóxicos. Para cada uno de ellos se han obtenido dos valores del modificador de la frecuencia: un modificador difuso y un modificador basado en la simulación de Monte Carlo. Por lo tanto, se han obtenido ocho valores de estos modificadores.

Los valores de los modificadores se han obtenido mediante la aplicación de un método de evaluación del comportamiento de cada empresa dependiendo de las condiciones de los factores humanos. Sin embargo, se ha visto que este método requería mucha información y que puede llegar a ser subjetivo, ya que dicha información la proporcionaban los propios responsables de seguridad de la empresa. Por ello, una futura mejora de esta tesis implicaría desarrollar una metodología de evaluación de la empresa más sencilla y que pudiera ser respondida por un agente externo empresa la misma, como un analista de riesgo o una entidad evaluadora. De todas maneras, para esta tesis y con los datos obtenidos de la evaluación del comportamiento de cada empresa, se ha visto que, en general, las empresas en donde las condiciones de los factores humanos propuestas en el modelo eran “pobres”, obtenían un valor de sus modificadores altos, cercanos a 1,50, que era el máximo valor posible. Por el contrario, las empresas con mejores condiciones de sus factores humanos obtuvieron valores más bajos de sus modificadores cercanos a 1. De esta manera, el valor de frecuencia no se ve prácticamente afectado.

Estos modificadores afectan directamente a las frecuencias iniciales de los sucesos contenidas en las bases de datos genéricas. Se decidió usar valores de frecuencia del BEVI, ya que son las usadas en los análisis cuantitativos de riesgo siguiendo la guía de referencia *Purple Book* y porque, como se ha mencionado anteriormente, no incluyen los factores

humanos. Estas frecuencias iniciales son la base para obtener la frecuencia final de los accidentes relacionados con un suceso iniciador. Por lo tanto, el modificador no sólo afecta a la frecuencia inicial sino también a la frecuencia final del accidente, de tal manera que, para cada caso de estudio, se ha calculado la frecuencia final de los accidentes y a estos valores se les ha aplicado los valores de los modificadores, obteniendo así nuevos valores de dicha frecuencia final.

Estos modificadores afectan directamente a las frecuencias iniciales de los sucesos contenidas en las bases de datos genéricas.. Se decidió usar valores de frecuencia del BEVI, ya que son las usadas en los análisis cuantitativos de riesgo siguiendo la guía de referencia *Purple Book* y porque, como se ha mencionado anteriormente, no incluyen los factores humanos. Multiplicando estos valores genéricos por los modificadores se han obtenido los valores finales de frecuencia, los cuales, como era de esperar, son más conservadores que los valores originales de frecuencia final utilizados en un ACR. Sin embargo, la diferencia no es excesiva ya que no se ha pretendido cambiar radicalmente los valores de la frecuencia, sino modificarlos de tal manera que los nuevos valores incluyan de forma razonable la influencia del factor humano.

Se ha observado también una diferencia entre los valores de frecuencias finales entre las dos metodologías propuestas, los valores obtenidos mediante la simulación de Monte Carlo han resultado ser siempre menores que los obtenidos por la lógica difusa. Por lo tanto, esta última metodología ha proporcionado resultados más conservadores, esto se debe a que la lógica difusa se basa en el pensamiento humano, el cual está reflejado por medio de las reglas difusas obtenidas por los expertos; en cambio, la simulación de Monte Carlo es una herramienta basada únicamente en cálculos numéricos y no presenta la duplicidad entre la decisión humana y el cálculo como sucede con la lógica difusa.

Una vez determinadas las nuevas frecuencias afectadas por los modificadores, así como las consecuencias de sus accidentes, se han representado las curvas de isorriesgo para el ACR sin tener en cuenta el factor humano y las curvas de isorriesgo usando las frecuencias modificadas para los cuatro casos de estudio propuestos. Así se ha podido observar la

afectación de los modificadores sobre la representación del riesgo. Entre los resultados de las empresas de almacenaje de productos inflamables (casos A y B), se ha notado un cambio notable en las curvas de una de ellas (caso A), mientras que en la otra (caso B) el cambio no es destacable. Esto se debe a que la empresa del caso A tiene unas condiciones deficientes en cuanto a los factores humanos. De manera muy similar, ha sucedido en los casos de las empresas de productos inflamables y tóxicos (casos C y D), donde en sólo una de ellas (C) se ha percibido el cambio en sus curvas debido, como para el caso A, a las pobres condiciones de sus factores.

Otra tarea futura a realizar después de esta tesis aparte de mejorar la evaluación del comportamiento de las empresas, sería comparar los resultados obtenidos con aquellas bases de datos genéricas que no sean el BEVI. De todas maneras para ello, sería necesario un estudio en detalle de lo que incluyen las otras fuentes de frecuencia.

Finalmente, destacar que aún con los esfuerzos que se han hecho en la ingeniería de los factores humanos, éstos siguen siendo un tema primordial que se deben de tomar en cuenta en el análisis del riesgo. Nuevos accidentes siguen ocurriendo especialmente en la industria química a causa de estos factores. Es por esto, que la inclusión de los factores humanos en la prevención de accidentes por medio del modificador creado es un aporte que era necesario en la ingeniería de riesgos industriales.

REFERENCIAS

AIChe, 1994. Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety. American Institute of Chemical Engineers, New York.

AIChe, 2005. Building process safety culture: Tools to enhance process safety performance. Piper Alpha case history.

Amsterdam, H.F. 2004. The use of Monte Carlo Simulation to wuantify the uncertainty in modeled estimates of toxic, radiation and overpressure impacts resulting from accidets in large chemical plants. Master thesis. Peninsula Technikon.

Andrews, J. D., & Dunnett, S. J. 2000. Event-tree analysis using binary decision diagrams. Reliability, IEEE Transactions on, 49(2), 230-238.

Arunraj N.S., Saptarshi Mandal, J. Maiti, 2013. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation. Accident Analysis and Prevention, 55, 242 – 255.

Baybutt P. 2008. The role of people and human factors in performing process hazard analyisi and layers of protection analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25, 1352-1365.

Bellamy, L. J., Geyer, T. A.W., Wilkinson, J. 2008. Development of a functional model which integrates human factors, safety management systems and wider organizational issues. Safety Science 46 (2008), 461–492.

Bello, G.C., Colombari, V., 1980. The human factors in risk analysis of process plants: the control room operator model (TESEO). Reliability Engineering 1 (1), 3–14.

Beerens, H. I., J. G. Post, and P. A. M. Uijt de Haag., 2006. The Use of Generic Failure Frequencies in QRA: The Quality and Use of Failure Frequencies and How to Bring them up-to-Date. *Journal of Hazardous Materials* 130, 265–70.

Betró, S. 2010. Environmental Risk Assessment of PBDE and HBCD in Ebro River Basin. UPC project.

Bojórquez-Tapia, L.A., Juárez, L., Cruz-Bello, G., 2002, Integrating fuzzy logic, optimization, and GIS for ecological impact assessments, *Environ. Manage.* 30, 418-433.

Britter, R. E. & McQuaid J. 1988. Workbook on the dispersion of dense gases. *Health & Safety Executive*, 128.

British Standards Institute, BS OHSAS 18001:2007: Occupational health and safety management systems – Requirements. London: BSI Global.

Cai, M. Tiefang, Z. Peng, L. Jun, 2014. Evaluation of Simulation Uncertainty in Accident Reconstruction via Combining Response Surface Methodology and Monte Carlo Method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, 241-255.

Cameron T., Raman R., 2005, Process system risk management. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.

Casal, Joaquim., 2007. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Elsevier Science. The Netherlands

Casal, J., Montiel, H., Planas, E., & Vilchez, J. A. 2001. Análisis del riesgo en instalaciones industriales Edicions UPC.

Changpeng, Y., Tangwen., Weina, Z., Shan, F. 2014. Human factors quantification via boundary identification of flight performance margin. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(4), 977 – 985.

Chen, G., & Zhang, X. 2009. Fuzzy-based methodology for performance assessment of emergency planning and its application. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(2), 125-132.

Cortés J.M. 2007. Técnicas de prevención de riesgos laborales. Seguridad e Higiene del trabajo. Editorial Tébar. Madrid.

CPR 18E. Guideline for quantitative risk assessment (Purple book). 2013. Directorate General for Social Affairs and Employment.

Crowl, D., Louvar, J.F. 2008. *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*. Prentice Hall. Third edition.

Cullen, W. 1990. *The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster, Presented to Parliament by the Secretary of State for Energy by Command of Her Majesty*. London: H.M. Stationery Office.

Darbra, R. M., Demichela M., Mure, S., 2008, Preliminary risk assessment of ecotoxic substances accidental releases in major risk installations through fuzzy logic, *Process Saf. Environ.*, 86, 103-111.

Darbra R.M., Casal J., 2009, Environmental risk assessment of accidental releases in chemical plants through fuzzy logic, *Chemical Engineering Transactions*, 17, 287-292.

Darbra, R. M., & Mure, S. 2008. Preliminary risk assessment of ecotoxic substances accidental releases in major risk installations through fuzzy logic. *Process safety and environmental protection*, 86(2), 103-111.

Dewey, J. M. 1964. The air velocity in blast waves from TNT explosions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 279(1378), 366-385.

Dubois, Didier J., and Henry Prade., 1980. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. Academic Press. NY.

Dykes, G.J., 1997. The Texaco Incident. In: H.-J. Uth (Editor), Workshop on Human AichePerformance in Chemical Safety. Umweltbundesamt, Munich.

Edwards, E., 1988. Human Factors in Aviation, Introductory Overview, San Diego, CA.

EU, 1996. Council Directive 96/82/EC (Seveso II) on Control of Major Accident Hazards involving Dangerous Substances. European Union.

Faghih-Roohi, S. Xie, M. Ming, K. 2014. Accident Risk Assessment in Marine Transportation via Markov Modelling and Markov Chain Monte Carlo Simulation. Ocean Engineering, 91, 363–370.

Ferraro, D. 2009. Fuzzy knowledge-based model for soil condition assessment in Argentinean cropping systems. Environmental Modelling and Software 24, p. 359-370.

Flemish Government. 2009. Handbook of failure frequencies for drawing up a safety report. Environment, Nature and Energy Policy Unit. http://www.lne.be/themas/veiligheidsrapportage/rlbvr/bestandenrlbvr/tr/vr_rlbvr_rl_hbff_EN.pdf (Oct. 10, 2012).

Frey H.C., E.S. Rubin, Evaluate uncertainties in advanced process technologies. Chemical Engineering Progress, 88, 63–70, 1992.

Frullini, M. 2012. Dispense del corso: affidabilita' e sicurezza degli impianti ad alto rischio.

Gass, S. I., Rapcsák, T. 2004. Singular value decomposition in AHP. European Journal of Operational Research 154 (3), 573-584.

Gentile, M., Rogers, W., & Mannan, M. 2001. Development of an inherent safety index using fuzzy logic. 2nd Annual Symposium of Mary Kay O'Connor Process Safety Center: Beyond Regulatory Compliance, Making Safety Second Nature, Oct, 30–31.

Gitahi Kariuki, S., Mayor Vadillo, E., Löwe, K. 2007. Human Factors Assessment Technique for the Chemical Process Industry. *Chem. Eng. Technol.* 30, 1319-1327

Flemish Government 2009. Handbook of failure frequencies for drawing up a safety report. LNE department, Environment, Nature and Energy Policy Unit. Belgium.

González, J.R., Darbra, R.M., Arnaldos, J., 2013. Using Fuzzy Logic to Introduce the Human Factor in the Failure Frequency Estimation of Storage Vessels in Chemical Plants. *Chemical Engineering Transactions* 32, 193-198.

Gordon, R.P., 1996. The contribution of human factors to accidents in the offshore industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 61. 93-108.

Grozdanovic, M. 2005. Usage of Human Reliability Quantification Methods. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)* 2005, Vol. 11, No. 2, 153–159.

Gürçanlı, G. E., & Müngen, U. 2009. An occupational safety risk analysis method at construction sites using fuzzy sets. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(2), 371-387.

Hannaman, G.W., Spurgin, A. J. 1984. Human cognitive reliability model for PRA analysis. Palo Alto CA: Electronic Power Research Institute.

Harms-Ringdahl, L. 2004. Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management. *Journal of Hazardous Materials*, 111(1-3), 13-19.

Referencias

Hauptmanns, Ulrich., 2011. The Impact of Differences in Reliability Data on the Results of Probabilistic Safety Analyses. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24, 274–280.

Health and Safety Executive (HSE). 2005. Human Factors in the management of major accident hazards.

<http://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/toolkitintro.pdf> (Nov. 17, 2012).

Health and Safety Executive (HSE), Failure Rate and Event data for use within Risk Assessments, 2012.

<http://www.hse.gov.uk/landuseplanning/failure-rates.pdf> (Nov, 2, 2012)

Health and Safety Executive (HSE). 2011. Managing contractors – A guide for employers.

<http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg159.pdf> (Nov. 16, 2012).

Health and Safety Executive (HSE). 1999. Reducing Error and Influencing Behaviour.

Health and Safety Executive (HSE). 2003. Organizational and major accident hazards- HSE Information sheet CHIS7

Hollnagel, E., 1998. Cognitive Reliability and Error Analysis Method. Elsevier Science Ltd, Oxford, UK.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. 1999. NTP 328: Análisis de riesgos mediante el árbol de sucesos.

International Labour Organization, ILO, 2001, Guidelines on occupational safety and health management systems. 2001.

Instrucció 14/2008 SIE, 2008. Criteris per a la realització de les Análisis Quantitatives de Risc a Catalunya (Purple Book i criteris complementaris). Generalitat de Catalunya.

Ismail, M. M., & Murray, S. G. 1993. Study of the blast waves from the explosion of nonspherical charges. *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 18(3), 132-138.

Itoh, H., Mitomo, N., Matsuoka, T and Murohara, Y., 2004. an Extension of m-SHEL Model for Analysis of Human Factors at Ship Operation, 3rd International Conference on Collision and Groundings of Ships, Izu, Japan, pp. 118 - 122.

Jang, J. 1997. *Fuzzy inference systems*. Prentice- Hall. NJ.

Kawano, R., 2002. *Medical Human Factor Topics*,
http://www.medicalsaga.ne.jp/tepsys/MHFT_tiics103.html.

Kahraman, C. 2001. Capital budgeting techniques using discounted fuzzy cash flows. In D. Ruan, J. Kacprzyk, & M. Fedrizzi (Eds.), *Soft computing for risk valuation and management: Applications in technology, environment and finance*, 375–396.

Kariuki, S. G., Vellido, E. M., Löwe, K. 2007. Human Factors Assessment Technique for the Chemical Process Industry. *Chemical Engineering & Technology*, 30 (10), 1319–1327.

Kariuki, S.G. and Löwe, K., 2004. Integrating Human Factors into Process Hazard Analysis. In: k. Kolowrocki (Editor), *Advances in Safety and Reliability*. Taylor and Francis, Tri-City pp. 1029 - 1035.

Kariuki, S.G. and Löwe, K., 2006. Increasing Human Reliability in The Chemical Process Industry Using Human Factors Techniques. *Process Safety and Environmental Protection*, 84(B3): 200 - 207.

Kim, J. W., Jung, W. 2003. A taxonomy of performance influencing factors for human reliability analysis of emergency tasks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16, 479-495.

Klir, George Jri, and Bo Yuan., 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Prentice-Hall. NJ.

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., Frede, H.G. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth* 27, p. 645–654.

Li, J., Huang, G. H., Zeng, G., Maqsood, I., & Huang, Y. 2007. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination. *Journal of Environmental Management*, 82(2), 173-188.

Li, P., Chen, G., Dai, L., Zhang, L. 2010. Fuzzy logic-based approach for identifying the risk importance of human error. *Safety Science*, 48, 902–913.

Löwe, K. and Kariuki, S.G., 2004a. Methods for Incorporating Human Factors during design phase, *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Loss Prevention Prague, pp. 5205-5215

Löwe, K. and Kariuki, S.G., 2004b. Berücksichtigung des Menschen beim Design verfahrenstechnischer Anlagen, 5. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. VDI-Verlag, Berlin, pp. 88-103.

Löwe, K., Kariuki, S.G., Porcsalmy, L. and Fröhlich, B., 2005. Development and Validation of a Human Factors Engineering Guideline for Process Industries *Loss Prevention Bulletin (lpb)*(Issue 182): 9-14.

Marchini, A., Facchinetti, T., Mistri, M. 2009. F-IND: A framework to design fuzzy indices of environmental conditions. *Ecological Indicators* 9 (3), 485-496.

Markowski, A.S., Mannan, M.S., 2009. Fuzzy logic for piping risk assessment (pfLOPA). *J Loss Prev Process Ind.*, 22, 921-927.

Markowski, A.S., Mannan, M.S., Kotynia, A., Pawlak. H., 2011. Application of fuzzy logic to explosion risk assessment. *J Loss Prev Process Ind* 24, 780-790.

- Mathworks, 2011. Fuzzy Logic Toolbox. Available from:
http://www.mathworks.com/help/toolbox/fuzzy/fuzzy_product_page.html (08.07.2011)
- McCafferty, D.B., 1995. Successful System Design Through Integrating Engineering and Human Factors. *Process Safety Progress*, 14(2): 147-151.
- Medina H., Arnaldos J., Casal J., Risk-Based Inspection and its Application to the Optimization of Chemical Plants, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 201-206.
- Minitab 17 Statistical Software, 2010. Quality Companion Computer software. State College, PA.
- Mokhtari, Hadi, Isa Nakhai Kamal Abadi, and Ali Cheraghlikhani., 2011. A Multi-Objective Flow Shop Scheduling with Resource-Dependent Processing Times: Trade-off between Makespan and Cost of Resources. *International Journal of Production Research* 49, 5851–5875.
- Mohan, M., Panwar, T. S., & Singh, M. P. 1995. Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness. *Atmospheric Environment*, 29(16), 2075-2087.
- Nait-Said, R., F. Zidani, and N. Ouzraoui., 2008. Fuzzy Risk Graph Model for Determining Safety Integrity Level. *International Journal of Quality, Statistics, and Reliability*, 1–12.
- Ocampo Dunque, W., Ferré Huguet, N., Domingo, J. L., Schuhmacher, M. (2006). Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. *Environment International* 32, (6), 733-742.
- Olivares J.F. 2007. Generación de valores de las variables aleatorias. Proyecto Universidad de Atacama.

Olmo Castillo, M. A., 2008. Tutorial de Introducción de Lógica Borrosa. Departamento de matemática aplicada. Facultad de informática. Universidad Politécnica Madrid. [En línea] <http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/tutfuzzy/contenido7ie.html>.

Paté-Cornell, M. E. 1993. Learning from the Piper Alpha accident: A postmortem analysis of technical and organizational factors. *Risk Analysis*,13 (2), 215–232.

Perez-Pueyo R. 2005. Conceptos fundamentales de la lógica difusa. Ediciones UNAM.

Pitblado R., Bain B., Falck A., Litland K., Spitzenberger C., 2011, Frequency data and modification factors used in QRA studies, *J. Loss Prevent. Proc.* 24, 249-258.

PRISM, 2004. Incorporation of Human Factors in the Design Process. www.prism-network.org.

Proctor, R.W., Van Zandt, T. 2008. Human factors in simple and complex systems. CRC Press, Boca Raton.

Qiao, Y., Keren, N., Mannan, M.S., 2009. Utilization of accident databases and fuzzy sets to estimate frequency of HazMat transport accidents. *J. Hazard. Mater.* 167, 374-382.

Ramirez, C. 2005. Seguridad Industrial: Un enfoque integral. Limusa. México.

Reason, J. T. 1994. Understanding adverse events: human factors. *Quality in Health Care* 4 (1995), 80-89.

Reason, J. T. 1990. Human Error. Cambridge University Press, New York.

Rezaie, K., Amalnik, M.S., Gereie, A., Ostadi, B., Shakhnaiee, M. 2007, Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management: Consideration of relationships between uncertainties. *Applied Mathematics and Computation*, 190, 1492-1501.

Reference Manual Bevi Risk Assessments (version 3.2) 2009. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). Bilthoven, The Netherlands. <http://www.rivm.nl/en/RIVM> (Nov. 02, 2012).

Ritz, W. J. 1981. Francis Hopkinson Law Reports, The. Law Libr. J., 74, 298.

Ronza, A., Félez, S., Darbra, R., Carol, S., Vílchez, J., Casal, J., 2003. Predicting the frequency of accidents in port areas by developing event trees from historical analysis. J Loss Prev Process Ind., 16, 551-560.

Ross, Timothy J., 2009. Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley & Sons. United Kingdom.

Rousseeuw, P. J. 1995. Discussion: Fuzzy clustering at the intersection. Technometrics, 37(3), 283-286.

Saaty, Thomas L., 1994. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. Interfaces 24, 19-43.

Seaver, D., Stillwell, W. G. 1983. Procedures for using expert judgement to estimate HEPS in nuclear power plant operations. NUREG/CR-2743, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, Dc.

Seguí, X., Darbra, R.M., Vílchez, Juan A., and Arnaldos, J., 2014. Methodology for the quantification of toxic dispersions originated in warehouse fires and its application to the QRA in Catalonia (Spain). Journal of Loss Prevention in the Process Industries 32. 404-414.

Shen, G., Lu, Y., Wang, M., Sun, Y. 2005. Status and fuzzy comprehensive assessment of combined heavy metal and organo-chlorine pesticide pollution in the Taihu Lake region of China. Journal of Environmental Management 76, 355-362.

Sivanandam S.N., Sumathi S., Deepa S.N. 2007. Introduction to fuzzy logic using matlab. Springer, New York, USA.

Smid, J.H., D. Verloo, G. C. Barker, A. H. Havelaar, 2010. Strengths and Weaknesses of Monte Carlo Simulation Models and Bayesian Belief Networks in Microbial Risk Assessment. *International Journal of Food Microbiology*, 139, 57–63.

Skogdalen, J. E., & Vinnem, J. E. 2011. Quantitative risk analysis offshore—Human and organizational factors. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(4), 468-479.

Standard, S. M. 2000. Analysis of positive reciprocal matrices, Master of Arts Thesis, University of Maryland.

Standards Australia, 2001, AS/NZS 4804: occupational health and safety management systems – general guidelines on principles, systems and supporting techniques. Wellington, Australia.

Stroeve, S.H., Blom, H.A.P and G.J. Bakker, 2009. Systemic Accident Risk Assessment in Air Traffic by Monte Carlo Simulation. *Safety Science*, 47, 238–249.

Swain, A. D., Guttman, H. E. 1983. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. NUREG/CR-1278, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, Dc.

Thole, U., Zimmermann, H., Zysno, P. 1979. On the suitability of minimum and product operators for the intersection of fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 2(2), 167-180

TNO, 2012b. TNO Safety Software. RISKCURVES Version 7. User and ReferenceManual.

Turner, B.A., 1978. Man-made Disasters. Wykeham, London

Turner, S. B. 1994. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. Lewis Publishers, Boca Raton.meiste

Referencias

Vilchez, J. A., Sevilla, S., Montiel, H., & Casal, J. (1995). Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 8(2), 87-96.

Villafañe D., Darbra R.M. and Casal J., 2011, Flash fire: historical analysis and modeling. *Chemical Engineering Transactions*, 24, 1111-1116

Wang, L.X., 1997. *A Course in fuzzy systems and control*. Prentice-Hall. NJ

Wiegman, D.A. and Shapell, S.A., 2003. *A Human Analysis to Aviation Accident Analysis*. Ashgate, Burlington.

Yen, J., Langari, R. 1999. *Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information*, Prentice Hall, MI.

Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control* 8, 338–353.

Zadeh, L.A. 2008. “Is there a need for fuzzy logic?.” *Information Sciences* 178 (13) (July): 2751–2777.

Zapata, C., Piñeros, L., Castaño D. 2003, El método de simulación en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica. *Scientia et Technica*. 24, 55-60.

Zhou, J., 2010. SPA-fuzzy method based real-time risk assessment for major hazard installations storing flammable gas. *Safety Science*. 48, 819-822.

Zimmerman, H. J. 1996. *Fuzzy sets theory and its applications*. Boston: Kluwer academic publishers.

ANEXOS

Anexo A. Definición de los conjuntos difusos

A1. Definición de los conjuntos difusos del primero grupo de variables

CONTRACTING	POOR	External employees are not required to have minimum technical safety knowledge. Safety instructions are not provided when arriving to the company.
	MEDIUM	Different options are compared when recruiting external personnel, but with not clear criteria. Basic safety instructions are provided to external employees before starting to work.
	EXCELLENT	The company ensures that the best external personnel are recruited through a contest based on safety criteria. Full safety instructions are provided before entering into the plant.
TRAINING	POOR	There is neither training program in the organization nor procedures for employees on how to perform their work.
	MEDIUM	There is a basic training program in the organization, but no specific procedures on how employees have to perform their tasks.
	EXCELLENT	A full training program is established at the organization, including its evaluation and revision. There exist specific procedures on how to carry out each task.
COMUNICACION & REPORTING	POOR	The communication is not good enough since the roles and responsibilities are not clear. There are no procedures to report incidents in the company.
	MEDIUM	Employees have general understanding of everyone roles and responsibilities and this ensures good communication. There exist procedures for reporting the incidents at the appropriate time and person but are confusing and ambiguous.
	EXCELLENT	There is a clear definition of supervisory roles and responsibilities. The communication is very good. If an incident is detected, it is well documented and reported through implemented procedures which are frequently evaluated.

A2. Definición de los conjuntos difusos del segundo grupo de variables

WORKLOAD MANAGEMENT	POOR	Shifts are too long and work breaks are not well scheduled. Excess of overtime is a normal practice in the company. Workers do not participate in the organization of the shifts.
	MEDIUM	There exist a good planning of the shifts, work schedules and overtime but is not fully implemented. There workers are not involved in the planning design.
	EXCELLENT	The company has implemented a proper shift planning with employees participation. A revision and evaluation of the work schedules, shifts, breaks and overtime is done periodically to ensure a better operation, otherwise corrective actions are implemented.
ENVIRONMENTAL CONDITIONS	POOR	Air quality is poor, exceeding EPA standards. Noise levels inadequate at workplace exceeding OSHA Standards. In many occasions workers have to stop working and the environmental conditions cause physical discomfort that lead to errors while performing their tasks.
	MEDIUM	Air quality is in an acceptable level according to EPA standards most of the time, in rare occasions causes discomfort. Noise almost always within OSHA standards.
	EXCELLENT	Noise and air conditions within EPA and OHSAS standard, never cause discomfort at work. The levels are periodically measured, revised and are maintained in optimal levels despite changes in the process.
SAFETY EQUIPMENT	POOR	Employees are not provided with appropriated protection equipment. No safety equipment is located in the company.
	MEDIUM	Employees are provided with the required equipment but normally do not wear it. There exists safety equipment in the plant but it is not appropriately located.
	EXCELLENT	Employees are provided with all the required protection equipment and they are always wearing it. The safety equipment is appropriately located in all the installations.

A3. Definición de los conjuntos difusos del segundo grupo de variables

SKILLS & KNOWLEDGE	POOR	Workers aptitudes and knowledge are not sufficient to perform their task correctly and have no experience in the working field, causing delays and operational incidents.
	MEDIUM	Employees have enough skills to perform their task on time and have some experience in the working field. However, some operational incidents still can occur.
	EXCELLENT	The employees have lot of experience in the operational field. Their entire task are optimally performed and on time. The skills and knowledge of the employee help other no-experienced workers to perform better their job.
PERSONAL BEHAVOIR	POOR	Employees have no motivation at work, do not follow the orders and do not have sense of improvement. Employees lack of attention is normal, so they are unable to solve incoming incidents. Team work is not a common practice.
	MEDIUM	Employees follow orders correctly most of the time with sense of improvement but no motivation at work. They are normally aware of incidents so they can deal with it satisfactorily. They have no problems with team-working.
	EXCELLENT	Workers are motivated and willing to improve and follow orders. Excellent team work and others employees encouragement. They are always aware of the situation to solve any problem that can occur.

Anexo B. Cuestionario completo

Human Factors

CERTEC

Using fuzzy logic to introduce the human factor in the failure frequency estimation of storage vessels in chemical plants

Start

For assistance on using the questionnaire please contact Mr. Jose Roberto González Dan at the UPC- CERTEC number (+34) 93 4016675 or by e-mail: jose.roberto.gonzales@upc.edu

Homepage General Instructions Contact details Introduction Instructions for rules 1Rules 2Rules 3Rules 4Rules Instructions for Weights Establishment of weights END

General Instructions and Information

For a better understanding of the questionnaire and to avoid confusions please read the information and follow the next instructions :

The questionnaire is divided in two parts: The rules formation and the establishment of weights. In each one of these parts you will be kindly asked to select different options.

If you need further information on any aspect of the questionnaire, please click on it and a brief description will be displayed:

Job Characteristics Factor

If you need to save the document and continue later, please click on the save icon located in the left part of the sheet.

To move within the questionnaire use the icons at the bottom of each page.

Back **Home** **Forward**

Homepage General Instructions Contact details Introduction Instructions for rules 1Rules 2Rules 3Rules 4Rules Instructions for Weights Establishment of weights END

Please provide your contact information

Name:

Country:

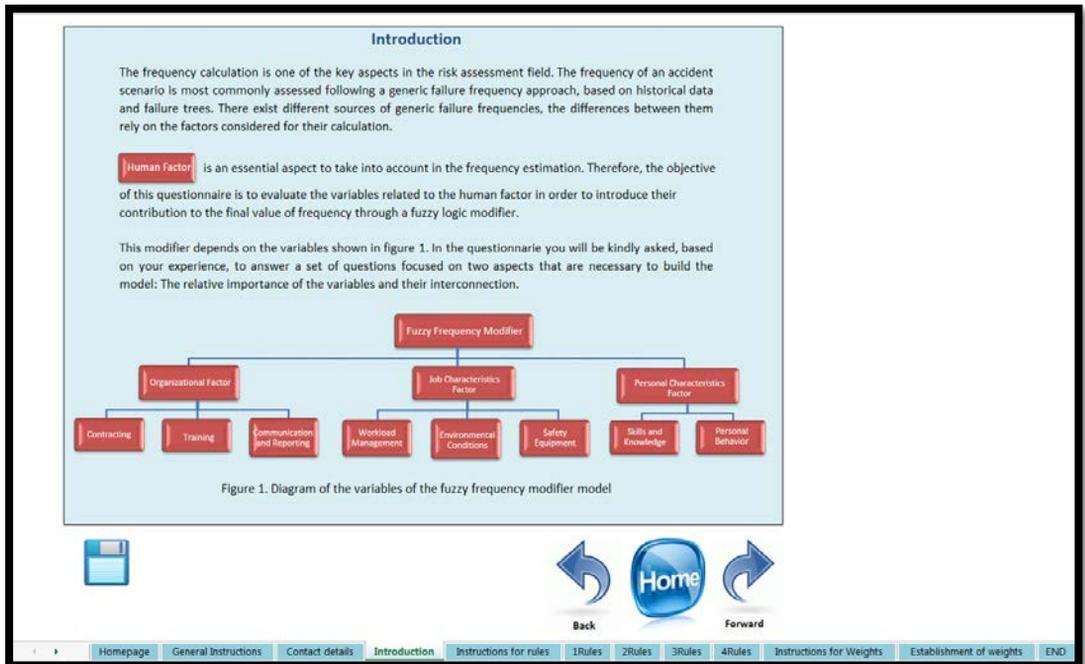
Job position:

Company / University:

Contact e-mail:

Homepage General Instructions Contact details Introduction Instructions for rules 1Rules 2Rules 3Rules 4Rules Instructions for Weights Establishment of weights END



Instructions for the rules formation

The following rules relate a given condition (antecedent) to a conclusion (consequent) in the form of "if - then".

You are kindly asked to complete the following statements in order to create the rules. The structure of the rule is presented next and an example is given:

" IF the CONTRACTING is POOR and the TRAINING is POOR and the COMMUNICATION & REPORTING is POOR THEN the ORGANIZATIONAL FACTOR will have a HIGH IMPACT on the fuzzy frequency modifier.

ANTECEDENTS										CONSEQUENT	
IF	Contracting	Poor	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	High Impact
								Medium			Low Impact
								Excellent			Medium Impact
											POOR

External employees are not required to have a minimum technical safety knowledge, safety instructions are not provided when arriving to the company.

There is neither training program in the organization nor instructions for employees on how to perform their work.

The communication is not good enough since the roles and responsibilities are not clear. There are no procedures to report incidents in the company.

If you place the mouse cursor on each set (Poor, Medium, Excellent), its description appears. Then, you should select in the consequent section, one of the options given for each of the lines. You need to complete all the consequent part until all the cells become in orange color.

Next you will find 4 slides in which you will be asked to fulfill the rules for the Organizational Factor, Job Characteristics Factor and the Fuzzy modifier.

Home

Homepage
General Instructions
Contact details
Introduction
Instructions for rules
1Rules
2Rules
3Rules
4Rules
Instructions for Weights
Establishment of weights
END

```

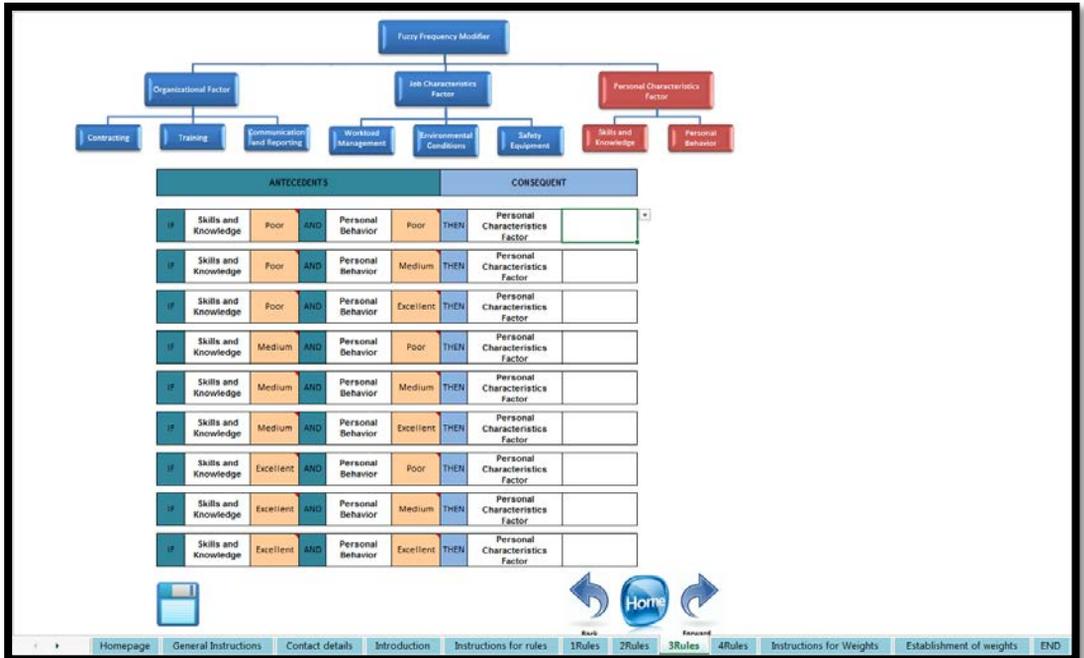
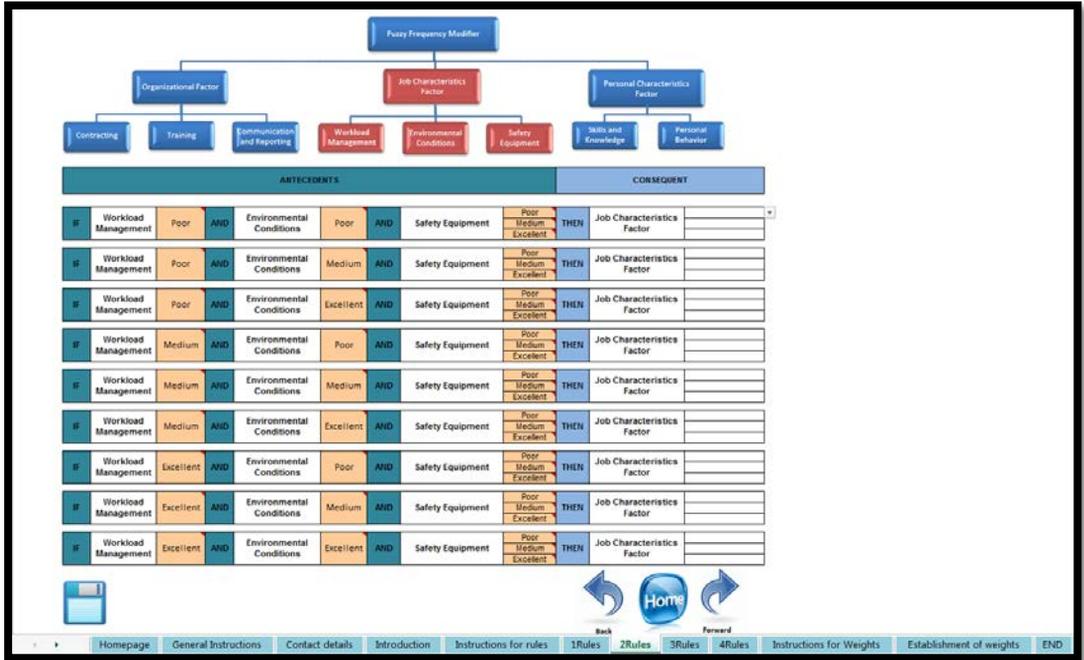
graph TD
    FFM[Fuzzy Frequency Modifier] --> OF[Organizational Factor]
    FFM --> JCF[Job Characteristics Factor]
    FFM --> PCF[Personal Characteristics Factor]
    OF --> C[Contracting]
    OF --> T[Training]
    OF --> CR[Communication and Reporting]
    JCF --> WM[Workload Management]
    JCF --> EC[Environmental Conditions]
    JCF --> SE[Safety Equipment]
    PCF --> SK[Skills and Knowledge]
    PCF --> PE[Personal Behavior]
            
```

ANTECEDENTS										CONSEQUENT	
I	Contracting	Poor	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
II	Contracting	Poor	AND	Training	Medium	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
III	Contracting	Poor	AND	Training	Excellent	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
IV	Contracting	Medium	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
V	Contracting	Medium	AND	Training	Medium	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
VI	Contracting	Medium	AND	Training	Excellent	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
VII	Contracting	Excellent	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
VIII	Contracting	Excellent	AND	Training	Medium	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	
IX	Contracting	Excellent	AND	Training	Excellent	AND	Communication and Reporting	Poor	THEN	Organizational Factor	

Home

Homepage
General Instructions
Contact details
Introduction
Instructions for rules
1Rules
2Rules
3Rules
4Rules
Instructions for Weights
Establishment of weights
END

Please, click on the arrow and fill in each line



The screenshot displays a web-based interface for a fuzzy logic inference engine. At the top, a hierarchical tree structure shows the 'Fuzzy Frequency Modifier' branching into three main categories: 'Organizational Factor', 'Job Characteristics Factor', and 'Personal Characteristics Factor'. Each category further branches into specific sub-factors: Organizational (Contracting, Training, Communication and Reporting), Job Characteristics (Workload Management, Environmental Conditions, Safety Equipment), and Personal (Skills and Knowledge, Personal Behavior).

Below the tree is a table of rules. The table is divided into 'ANTECEDENTS' and 'CONSEQUENT' columns. Each rule row contains a sequence of factors and their values, connected by 'AND' operators, followed by a 'THEN' operator and the 'Fuzzy Frequency Modifier' consequent. The values for the antecedents are color-coded: Poor (orange), Medium (yellow), and Excellent (green).

ANTECEDENTS										CONSEQUENT		
IF	Organizational Factor	Poor	AND	Job Characteristics Factor	Poor	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Poor	AND	Job Characteristics Factor	Medium	AND	Personal Characteristics Factor	Medium	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Poor	AND	Job Characteristics Factor	Excellent	AND	Personal Characteristics Factor	Excellent	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Medium	AND	Job Characteristics Factor	Poor	AND	Personal Characteristics Factor	Medium	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Medium	AND	Job Characteristics Factor	Medium	AND	Personal Characteristics Factor	Medium	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Medium	AND	Job Characteristics Factor	Excellent	AND	Personal Characteristics Factor	Excellent	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Excellent	AND	Job Characteristics Factor	Poor	AND	Personal Characteristics Factor	Medium	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Excellent	AND	Job Characteristics Factor	Medium	AND	Personal Characteristics Factor	Excellent	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		
IF	Organizational Factor	Excellent	AND	Job Characteristics Factor	Excellent	AND	Personal Characteristics Factor	Excellent	THEN	Fuzzy Frequency Modifier		

At the bottom of the interface, there is a navigation menu with buttons for 'Homepage', 'General Instructions', 'Contact details', 'Introduction', 'Instructions for rules', '1Rules', '2Rules', '3Rules', '4Rules', 'Instructions for Weights', 'Establishment of weights', and 'END'. There are also 'Back', 'Home', and 'Forward' buttons.

The screenshot shows the 'Establishment of Weights' section of the interface. It contains two main text boxes. The first box, titled 'Establishment of Weights', explains that factors may not have the same importance and influence, so they must be weighted according to expert opinion. The second box, titled 'Instructions', provides guidance on how to compare variables for importance.

Establishment of Weights

Since the factors considered in this study may not have the same importance and influence in the frequency calculation, they have to be weighted according to your expert opinion.

Instructions

When comparing the variables you will be asked for the importance between the ones available.

Example:

Between the Workload Management and the Environmental conditions, which parameter do you think is most important?

If you think the Workload Management is MORE IMPORTANT than the Environmental Conditions, you will mark the box as shown:

Extremely Less Important
 Less Important
 Equal important
 More important
 Extremely more important

Workload Management is than Environmental conditions

The interface includes a navigation menu at the bottom with buttons for 'Homepage', 'General Instructions', 'Contact details', 'Introduction', 'Instructions for rules', '1Rules', '2Rules', '3Rules', '4Rules', 'Instructions for Weights', 'Establishment of weights', and 'END'. There are also 'Back', 'Home', and 'Forward' buttons.

Establishment of Weights

Please select the best option according your criteria

Contracting	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Training
Contracting	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Communication and Reporting
Training	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Communication and Reporting
Workload Management	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Environmental Conditions
Workload Management	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Safety Equipment
Environmental Conditions	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Safety Equipment
Skills and Knowledge	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Personal Behavior
Organizational Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Job Characteristics Factor
Organizational Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Personal Characteristics Factor
Job Characteristics Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important <input type="checkbox"/> Less important <input type="checkbox"/> Equal important <input type="checkbox"/> More important <input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Personal Characteristics Factor

Homepage
General Instructions
Contact details
Introduction
Instructions for rules
1Rules
2Rules
3Rules
4Rules
Instructions for Weights
Establishment of weights
END




THANK YOU VERY MUCH FOR YOUR CONTRIBUTION.

SAVE

PLEASE SAVE THE FILE AND SEND IT TO:

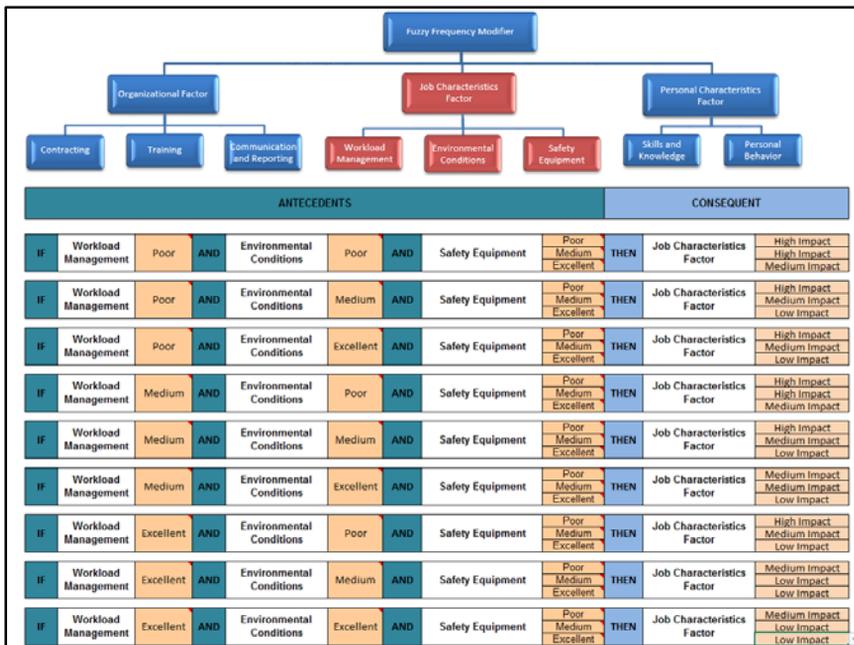
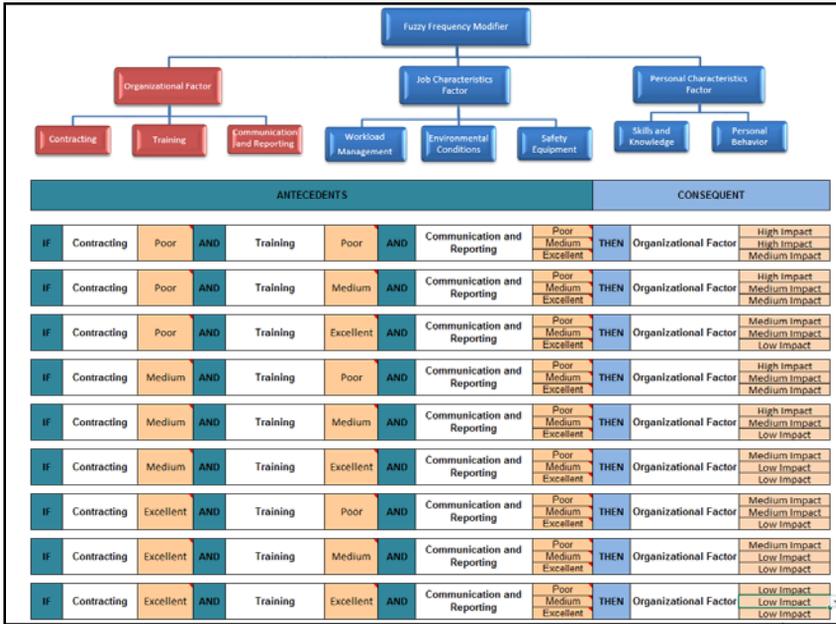
jose.roberto.gonzalez@upc.edu

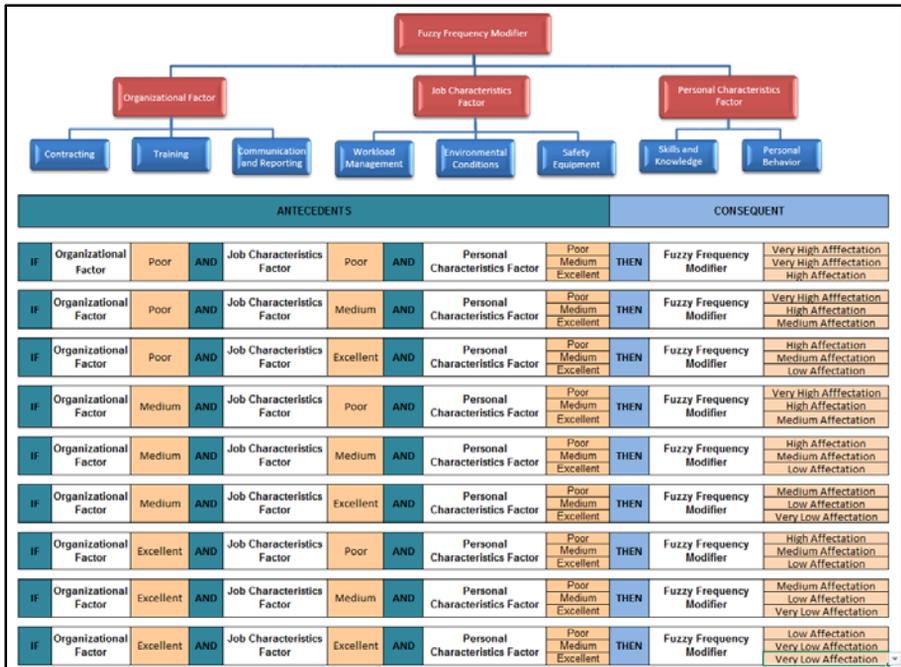
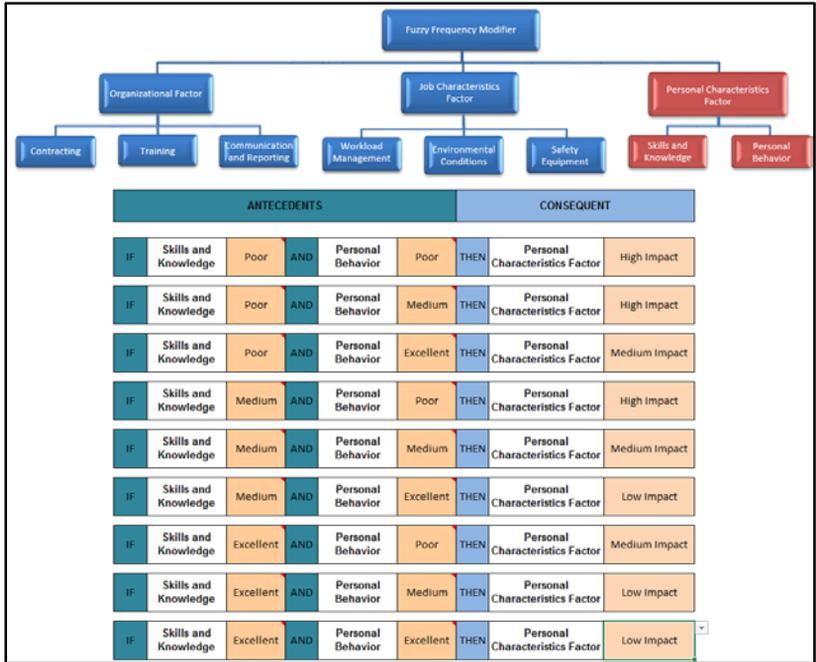
ADDITIONAL COMMENTS AND REMARKS




Homepage
General Instructions
Contact details
Introduction
Instructions for rules
1Rules
2Rules
3Rules
4Rules
Instructions for Weights
Establishment of weights
END

Anexo C. Cuestionario respondido por un experto





Establishment of Weights

Please select the best option according your criteria

Contracting	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input checked="" type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Training
Contracting	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input checked="" type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Communication and Reporting
Training	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input checked="" type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Communication and Reporting
Workload Management	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input checked="" type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Environmental Conditions
Workload Management	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input checked="" type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Safety Equipment
Environmental Conditions	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input checked="" type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Safety Equipment
Skills and Knowledge	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input checked="" type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Personal Behavior
Organizational Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input checked="" type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Job Characteristics Factor
Organizational Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input type="checkbox"/> Equal important	<input checked="" type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Personal Characteristics Factor
Job Characteristics Factor	is	<input type="checkbox"/> Extremely Less Important	<input type="checkbox"/> Less important	<input checked="" type="checkbox"/> Equal important	<input type="checkbox"/> More important	<input type="checkbox"/> Extremely more important	than	Personal Characteristics Factor

Anexo D. Respuestas de los expertos para los grupos 2, 3 y 4 para la obtención de las reglas

D1. Respuestas de los expertos para el primer grupo de variables

Regla	Excelentes	Medias	Pobres
1	0	0	40
2	0	5	34
3	0	25	14
4	0	4	36
5	1	26	13
6	4	33	3
7	1	22	17
8	8	28	4
9	29	10	1
10	0	4	36
11	1	16	23
12	5	29	6
13	1	19	20
14	4	32	4
15	20	19	1
16	2	28	10
17	17	21	2
18	32	7	1
19	2	5	33
20	2	25	13
21	15	22	3
22	1	29	10
23	10	27	3
24	31	6	3
25	4	31	5
26	32	7	1
27	39	0	1

C2. Respuestas de los expertos para el segundo grupo de variables

Rules	Excelentes	Medias	Pobres
1	0	0	40
2	0	4	36
3	0	17	23
4	0	3	37
5	0	15	25
6	5	26	9
7	0	11	28
8	5	23	11
9	12	24	3
10	0	3	37
11	1	18	21
12	6	28	6
13	0	15	25
14	4	35	1
15	14	26	0
16	0	27	13
17	12	26	1
18	31	8	1
19	1	8	31
20	1	25	14
21	12	23	5
22	2	24	14
23	14	26	0
24	31	8	1
25	4	29	7
26	25	15	0
27	40	0	0

C3. Respuestas de los expertos para el primer cuarto de variables

Rules	Muy baja afectación	Baja afectación	Media afectación	Alta afectación	Muy alta afectación
1	0	0	0	3	37
2	0	0	2	9	29
3	0	0	6	30	4
4	0	0	1	5	34
5	1	0	4	31	4
6	0	1	17	20	2
7	0	0	2	26	12
8	2	1	17	16	4
9	0	11	23	4	2
10	1	0	2	9	28
11	0	1	5	30	4
12	0	5	19	14	2
13	0	1	6	25	8
14	0	3	30	7	0
15	1	18	19	2	0
16	1	2	14	18	5
17	1	16	19	4	0
18	5	28	6	1	0
19	0	0	7	20	13
20	0	3	19	14	4
21	0	22	11	5	2
22	0	4	15	15	6
23	1	18	18	3	0
24	19	18	3	0	0
25	2	13	13	7	5
26	13	19	8	0	0
27	37	3	0	0	0

Anexo D. Reglas finales obtenidas de la opinión de los expertos

D1. Reglas finales obtenidas para el primer grupo de variables

ANTECEDENTS										CONSEQUENT		
IF	Contracting	Poor	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Poor Poor Medium	
IF	Contracting	Poor	AND	Training	Medium	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Poor Medium Medium	
IF	Contracting	Poor	AND	Training	Excellent	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Medium Medium Excellent	
IF	Contracting	Medium	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Poor Poor Medium	
IF	Contracting	Medium	AND	Training	Medium	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Medium Medium Medium	
IF	Contracting	Medium	AND	Training	Excellent	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Medium Medium Excellent	
IF	Contracting	Excellent	AND	Training	Poor	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Poor Medium Medium	
IF	Contracting	Excellent	AND	Training	Medium	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Medium Medium Excellent	
IF	Contracting	Excellent	AND	Training	Excellent	AND	Communication and Reporting	Poor Medium Excellent	THEN	Organizational Factor	Medium Excellent Excellent	

D2. Reglas finales obtenidas para el segundo grupo de variables

ANTECEDENTS										CONSEQUENT		
IF	Workload Management	Poor	AND	Environmental Conditions	Poor	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Poor Poor Poor	
IF	Workload Management	Poor	AND	Environmental Conditions	Medium	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Poor Poor Medium	
IF	Workload Management	Poor	AND	Environmental Conditions	Excellent	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Poor Medium Medium	
IF	Workload Management	Medium	AND	Environmental Conditions	Poor	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Poor Poor Medium	
IF	Workload Management	Medium	AND	Environmental Conditions	Medium	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Medium Medium Medium	
IF	Workload Management	Medium	AND	Environmental Conditions	Excellent	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Medium Medium Excellent	
IF	Workload Management	Excellent	AND	Environmental Conditions	Poor	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Poor Medium Medium	
IF	Workload Management	Excellent	AND	Environmental Conditions	Medium	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Medium Medium Excellent	
IF	Workload Management	Excellent	AND	Environmental Conditions	Excellent	AND	Safety Equipment	Poor Medium Excellent	THEN	Job Characteristics Factor	Medium Excellent Excellent	

D3. Reglas finales obtenidas para el cuarto grupo de variables

ANTECEDENTS							CONSEQUENT				
IF	Organizational Factor	Poor	AND	Job Characteristics Factor	Poor	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	Very High
							Medium	Very High			
							Excellent	High			
IF	Organizational Factor	Poor	AND	Job Characteristics Factor	Medium	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	Very High
							Medium	High			
							Excellent	High			
IF	Organizational Factor	Poor	AND	Job Characteristics Factor	Excellent	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	High
							Medium	High			
							Excellent	Medium			
IF	Organizational Factor	Medium	AND	Job Characteristics Factor	Poor	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	Very High
							Medium	High			
							Excellent	High			
IF	Organizational Factor	Medium	AND	Job Characteristics Factor	Medium	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	High
							Medium	Medium			
							Excellent	Medium			
IF	Organizational Factor	Medium	AND	Job Characteristics Factor	Excellent	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	High
							Medium	Medium			
							Excellent	Low			
IF	Organizational Factor	Excellent	AND	Job Characteristics Factor	Poor	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	High
							Medium	Medium			
							Excellent	Low			
IF	Organizational Factor	Excellent	AND	Job Characteristics Factor	Medium	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	High
							Medium	Medium			
							Excellent	Low			
IF	Organizational Factor	Excellent	AND	Job Characteristics Factor	Excellent	AND	Personal Characteristics Factor	Poor	THEN	Fuzzy Frequency Modifier	Medium
							Medium	Low			
							Excellent	Very Low			

Anexo F. Respuestas de los expertos para los grupos 1, 3 y 4 para la obtención de los pesos de las variables

Tabla F1. Respuestas del grupo de variables 1

Grupo 1	Factor organizacional vs Factor de las características del trabajo	Factor organizacional vs Factor de las características personales	Factor de las características del trabajo vs Factor de las características personales
Extremadamente menos importante	1	2	3
Menos importante	4	9	10
Igual importancia	15	13	18
Más importante	17	13	6
Extremadamente más importante	2	2	2

Tabla F2. Respuestas del grupo de variables 3

Grupo 3	Gestión carga de trabajo vs Condiciones medioambientales	Gestión carga de trabajo vs Equipamiento de seguridad	Condiciones medioambientales vs Equipamiento de seguridad
Extremadamente menos importante	0	0	1
Menos importante	6	11	9
Igual importancia	17	14	15
Más importante	14	11	13
Extremadamente más importante	2	3	1

Tabla F3. Respuestas del grupo de variables 4

Grupo 4	Habilidades y conocimiento vs Comportamiento personal
Extremadamente menos importante	1
Menos importante	11
Igual importancia	16
Más importante	8
Extremadamente más importante	3

Resultado del número de respuestas consistentes para los pesos

Tabla F1. Respuestas consistentes del grupo de variables 2

Group 2	Subcontratación vs Formación	Subcontratación vs Comunicación e Informe	Formación vs Comunicación e Informe
Extremadamente menos importante	2	0	0
Menos importante	13	9	3
Igual importancia	9	11	10
Más importante	2	5	11
Extremadamente más importante	0	1	2

Tabla F1. Respuestas consistentes del grupo de variables 3

Group 3	Gestión carga de trabajo vs Condiciones medioambientales	Gestión carga de trabajo vs Equipamiento de seguridad	Condiciones medioambientales vs Equipamiento de seguridad
Extremadamente menos importante	0	0	1
Menos importante	4	6	4
Igual importancia	13	9	11
Más importante	5	6	7
Extremadamente más importante	1	2	0

Tabla F1. Respuestas consistentes del grupo de variables 4

Grupo 4	Habilidades y conocimiento vs Comportamiento personal
Extremadamente menos importante	1
Menos importante	11
Igual importancia	16
Más importante	8
Extremadamente más importante	3

Anexo G. Índices de sensibilidad de las situaciones propuestas

G1. Situación 1

Tabla G1.

data first group of variables		independent variable				sensitivity index				sensitivity index with weights			
		x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}
x = contracting													
y = organizational factor													
training = 5		2,00	0,50	1,50	2,50	2,27	2,23	2,36	11,45374	3,34	3,33	3,34	0,152386
communication and reporting = 2,5		3,50	0,88	2,63	4,38	2,38	2,39	2,23	13,44538	3,34	3,34	3,34	0
		5,00	1,25	3,75	6,25	2,2	2,33	2,85	47,27273	3,33	3,34	4,17	11,76713
		6,50	1,63	4,88	8,13	3,18	2,19	5	176,7296	4,18	3,34	5	28,83267
		8,00	2,00	6,00	10,00	5	2,6	5	96	5	4,15	5	16,34615
MEDIA		68,98								11,42			
x = training													
y = organizational factor													
contracting = 2,5		2,00	0,50	1,50	2,50	2,07	2,03	2,19	15,45894	1,68	1,62	2,19	17,29856
communication and reporting = 2,5		3,50	0,88	2,63	4,38	2,41	2,23	2,38	12,44813	2,85	2,28	3,09	15,35756
		5,00	1,25	3,75	6,25	2,36	2,41	2,94	44,91525	3,34	2,96	3,89	13,63331
		6,50	1,63	4,88	8,13	3,25	2,36	5	162,4615	4	3,13	5	32,19015
		8,00	2,00	6,00	10,00	5	2,72	5	91,2	5	3,8	5	22,05882
MEDIA		65,30								20,11			
x = communication and reporting													
y = organizational factor													
contracting = 2,5		2,00	0,50	1,50	2,50	1,87	1,82	2,36	57,75401	1,52	1,5	3,34	62,18913
training = 5		3,50	0,88	2,63	4,38	4,28	2,61	4,9	107,0093	3,47	3,36	3,55	4,489494
		5,00	1,25	3,75	6,25	5	4,55	5	18	5	3,51	5	16,37363
		6,50	1,63	4,88	8,13	5	5	5	0	5	3,57	5	14,3
		8,00	2,00	6,00	10,00	5	5	5	0	5	5	5	0
MEDIA		36,55								19,47			

Tabla G2

data third group of variables		independent variable				sensitivity index			
		x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}
x = skills & knowledge									
y = personal characteristic factor									
personal behaviour = 5		2,00	0,50	1,50	2,50	1,35	1,24	2,4	171,8519
		3,50	0,88	2,63	4,38	4,82	2,86	5	88,79668
		5,00	1,25	3,75	6,25	5	4,96	5,04	3,2
		6,50	1,63	4,88	8,13	5,18	5	8,68	142,0849
		8,00	2,00	6,00	10,00	8,65	5	8,86	89,24855
MEDIA		99,04							
x = personal behaviour									
y = personal characteristic factor									
skills & knowledge = 2,5		2,00	0,50	1,50	2,50	1,66	1,61	1,9	34,93976
		3,50	0,88	2,63	4,38	2,43	2	2,4	32,92181
		5,00	1,25	3,75	6,25	2,4	2,43	2,49	5
		6,50	1,63	4,88	8,13	2,71	2,4	5,42	222,8782
		8,00	2,00	6,00	10,00	5,41	2,42	5,44	111,6451
MEDIA		81,48							

Tabla G3.

data fourth group of variables	independent variable				sensitivity index			
x = organizational factor y = fuzzy frequency modiefier job characteristic factor = 3,93 personal characteristic factor = 2,4	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,36	1,38	1,35	4,411765
	3,50	0,88	2,63	4,38	1,33	1,35	1,32	4,511278
	5,00	1,25	3,75	6,25	1,32	1,33	1,32	1,515152
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,32	1,32	1,31	1,515152
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,31	1,32	1,31	1,526718
MEDIA	2,70							
x = job characteristic factor y = fuzzy frequency modiefier organizational factor = 2,36 personal characteristic factor = 2,4	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,38	1,39	1,37	2,898551
	3,50	0,88	2,63	4,38	1,36	1,37	1,35	2,941176
	5,00	1,25	3,75	6,25	1,35	1,35	1,35	0
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,35	1,35	1,34	1,481481
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,34	1,35	1,34	1,492537
MEDIA	1,76							
x = personal characteristic factor y = fuzzy frequency modiefier organizational factor = 2,36 job characteristic factor = 3,93	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,37	1,38	1,35	4,379562
	3,50	0,88	2,63	4,38	1,33	1,35	1,32	4,511278
	5,00	1,25	3,75	6,25	1,32	1,33	1,32	1,515152
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,32	1,32	1,32	0
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,32	1,32	1,32	0
MEDIA	2,08							

G2. Situación 2

Tabla G2

data first group of variables	independent variable				sensitivity index				sensitivity index with weights			
x = contracting y = organizational factor training = 8,5 communication and reporting = 5	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	5	5	5	0	5	5	5	0
	3,50	0,88	2,63	4,38	5	5	5	0	5	5	5	0
	5,00	1,25	3,75	6,25	5	5	5,5	20	5	5	6,51	15,1
	6,50	1,63	4,88	8,13	5,78	5	8,37	116,609	6,54	5	8,51	31,0211
	8,00	2,00	6,00	10,00	8,35	5,31	8,5	76,40719	8,5	6,49	8,53	18,87006
MEDIA	42,60								13,00			
x = training y = organizational factor contracting = 8,5 communication and reporting = 5	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	5	5	5	0	5	5	5	0
	3,50	0,88	2,63	4,38	5	5	5	0	5	5	5	0
	5,00	1,25	3,75	6,25	5	5	5,5	20	5	5	6,19	11,9
	6,50	1,63	4,88	8,13	5,78	5	8,37	116,609	6,31	5	8,49	31,96862
	8,00	2,00	6,00	10,00	8,35	5,31	8,5	76,40719	8,47	6,11	8,56	22,74284
MEDIA	42,60								13,32			
x = communication and reporting y = organizational factor contracting = 8,5 training = 8,5	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	5	5	5,29	11,6	5	5	6,5	15
	3,50	0,88	2,63	4,38	7,13	5,49	8,26	77,69986	6,67	6,51	6,73	2,141825
	5,00	1,25	3,75	6,25	8,42	7,54	8,18	15,2019	8,52	6,67	8,45	11,66517
	6,50	1,63	4,88	8,13	8,1	8,41	8,3	2,716049	8,45	6,75	8,49	9,916344
	8,00	2,00	6,00	10,00	8,28	8,26	8,42	3,864734	8,48	8,46	8,52	0,35463
MEDIA	22,22								7,82			

Tabla G3.

data second group of variables	independent variable				sensitivity index			
x = workload management y = job characteristic factor environmental conditions = 2,5 safety equipment = 5	x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}
	2,00	0,50	1,50	2,50	2,91	2,52	3,3	53,60825
	3,50	0,88	2,63	4,38	3,77	3,38	3,89	27,0557
	5,00	1,25	3,75	6,25	3,93	3,82	4,13	15,77608
	6,50	1,63	4,88	8,13	4,2	3,92	4,79	41,42857
	8,00	2,00	6,00	10,00	4,76	4,06	4,99	39,07563
MEDIA					35,39			
x = environmental conditions y = job characteristic factor workload management = 8,5 safety equipment = 5	x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}
	2,00	0,50	1,50	2,50	4,81	4,74	4,87	5,405405
	3,50	0,88	2,63	4,38	4,97	4,89	5,01	4,828974
	5,00	1,25	3,75	6,25	5,04	4,99	5,19	7,936508
	6,50	1,63	4,88	8,13	5,26	5,03	6,3	48,28897
	8,00	2,00	6,00	10,00	6,2	5,13	7,14	64,83871
MEDIA					26,26			
x = safety equipment y = job characteristic factor workload management = 8,5 environmental conditions = 2,5	x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}
	2,00	0,50	1,50	2,50	4,25	4,05	4,47	19,76471
	3,50	0,88	2,63	4,38	4,76	4,52	4,85	13,86555
	5,00	1,25	3,75	6,25	4,87	4,8	4,96	6,570842
	6,50	1,63	4,88	8,13	5	4,87	5,49	24,8
	8,00	2,00	6,00	10,00	5,45	4,93	5,79	31,55963
MEDIA					19,31			

Tabla G4.

data third group of variables	independent variable				sensitivity index			
x = skills & knowledge y = personal characteristic factor personal behaviour = 8,5	x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}
	2,00	0,50	1,50	2,50	5	5	5,43	17,2
	3,50	0,88	2,63	4,38	8,18	5,71	8,73	73,83863
	5,00	1,25	3,75	6,25	8,76	8,54	8,62	1,826484
	6,50	1,63	4,88	8,13	8,53	8,76	8,59	3,985932
	8,00	2,00	6,00	10,00	8,56	8,68	8,76	1,869159
MEDIA					19,74			
x = personal behaviour y = personal characteristic factor skills & knowledge = 5	x_0	Δx	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	I_{Σ}
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,35	1,24	2,4	171,8519
	3,50	0,88	2,63	4,38	4,82	2,86	5	88,79668
	5,00	1,25	3,75	6,25	5	4,96	5,04	3,2
	6,50	1,63	4,88	8,13	5,18	5	8,68	142,0849
	8,00	2,00	6,00	10,00	8,65	5	8,86	89,24855
MEDIA					99,04			

Tabla G5.

data fourth group of variables	independent variable				sensitivity index			
x = organizational factor y = fuzzy frequency modiefier job characteristic factor = 4,87 personal characteristic factor = 8,76	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,33	1,35	1,31	6,015038
	3,50	0,88	2,63	4,38	1,27	1,3	1,26	6,299213
	5,00	1,25	3,75	6,25	1,25	1,27	1,24	4,8
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,23	1,25	1,18	11,38211
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,18	1,24	1,15	15,25424
MEDIA								8,75
x = job characteristic factor y = fuzzy frequency modiefier organizational factor = 8,42 personal characteristic factor = 8,76	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,18	1,19	1,18	1,694915
	3,50	0,88	2,63	4,38	1,17	1,18	1,17	1,709402
	5,00	1,25	3,75	6,25	1,17	1,17	1,16	1,709402
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,16	1,17	1,12	8,62069
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,13	1,16	1,1	10,61947
MEDIA								4,87
x = personal characteristic factor y = fuzzy frequency modiefier organizational factor = 8,42 job characteristic factor = 4,87	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,33	1,35	1,31	6,015038
	3,50	0,88	2,63	4,38	1,27	1,3	1,25	7,874016
	5,00	1,25	3,75	6,25	1,25	1,26	1,24	3,2
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,23	1,25	1,18	11,38211
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,19	1,24	1,16	13,44538
MEDIA								8,38

G3. Situación 3

Tabla G3.

data first group of variables	independent variable				sensitivity index (NO weights)				sensitivity index (YES weights)			
x = contracting y = organizational factor training = 2,5 communication and reporting = 5	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	2,27	2,23	2,36	11,45374	3,1	3,11	3,04	1,149284
	3,50	0,88	2,63	4,38	2,38	2,39	2,23	13,44538	3,05	3,04	3,07	0,489746
	5,00	1,25	3,75	6,25	2,19	2,33	2,85	47,48858	3,13	3,06	4	14,11373
	6,50	1,63	4,88	8,13	3,18	2,19	5	176,7296	4,03	3,07	5	34,77005
	8,00	2,00	6,00	10,00	5	2,6	5	96	5	3,98	5	19,61538
MEDIA								69,02	14,03			
x = training y = organizational factor contracting = 5 communication and reporting = 5	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,58	1,5	2,19	87,34177	1,51	1,47	3,13	57,89845
	3,50	0,88	2,63	4,38	4,2	2,47	4,87	114,2857	3,66	3,19	3,92	16,95759
	5,00	1,25	3,75	6,25	5	4,48	5	20,8	5	3,77	5	13,72768
	6,50	1,63	4,88	8,13	5	5	5	0	5	3,96	5	10,4
	8,00	2,00	6,00	10,00	5	5	5	0	5	5	5	0
MEDIA								44,49	19,80			
x = communication and reporting y = organizational factor contracting = 5 training = 2,5	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς	y ₀	y ₁	y ₂	I _ς
	2,00	0,50	1,50	2,50	1,87	1,82	2,03	22,45989	1,68	1,66	2,32	20,1825
	3,50	0,88	2,63	4,38	2,28	2,09	2,21	10,52632	2,47	2,33	2,57	5,299963
	5,00	1,25	3,75	6,25	2,19	2,27	2,85	52,96804	3,13	2,51	4	22,96308
	6,50	1,63	4,88	8,13	3,18	2,19	5	176,7296	4,03	2,59	5	43,41752
	8,00	2,00	6,00	10,00	5	2,6	5	96	5	3,98	5	19,61538
MEDIA								71,74	22,30			

Tabla G4.

data second group of variables	independent variable				sensitivity index			
x = workload management	x₀	Δx	x₁	x₂	y₀	y₁	y₂	I_Σ
y = job characteristic factor	2,00	0,50	1,50	2,50	2,91	2,52	3,3	53,60825
environmental conditions = 2,5	3,50	0,88	2,63	4,38	3,77	3,38	3,89	27,0557
safety equipment = 5	5,00	1,25	3,75	6,25	3,93	3,82	4,13	15,77608
	6,50	1,63	4,88	8,13	4,2	3,92	4,79	41,42857
	8,00	2,00	6,00	10,00	4,76	4,06	4,99	39,07563
MEDIA								35,39
x = environmental conditions	x₀	Δx	x₁	x₂	y₀	y₁	y₂	I_Σ
y = job characteristic factor	2,00	0,50	1,50	2,50	2,91	2,52	3,3	53,60825
workload management = 2,5	3,50	0,88	2,63	4,38	3,77	3,38	3,89	27,0557
safety equipment = 5	5,00	1,25	3,75	6,25	3,93	3,82	4,13	15,77608
	6,50	1,63	4,88	8,13	4,2	3,92	4,79	41,42857
	8,00	2,00	6,00	10,00	4,76	4,06	4,99	39,07563
MEDIA								35,39
x = safety equipment	x₀	Δx	x₁	x₂	y₀	y₁	y₂	I_Σ
y = job characteristic factor	2,00	0,50	1,50	2,50	2,78	2,54	3,01	33,81295
workload management = 2,5	3,50	0,88	2,63	4,38	3,25	2,06	3,28	75,07692
environmental conditions = 2,5	5,00	1,25	3,75	6,25	3,3	3,27	3,53	15,75758
	6,50	1,63	4,88	8,13	3,63	3,29	4,38	60,0551
	8,00	2,00	6,00	10,00	4,34	3,45	4,57	51,6129
MEDIA								47,26

Tabla G5.

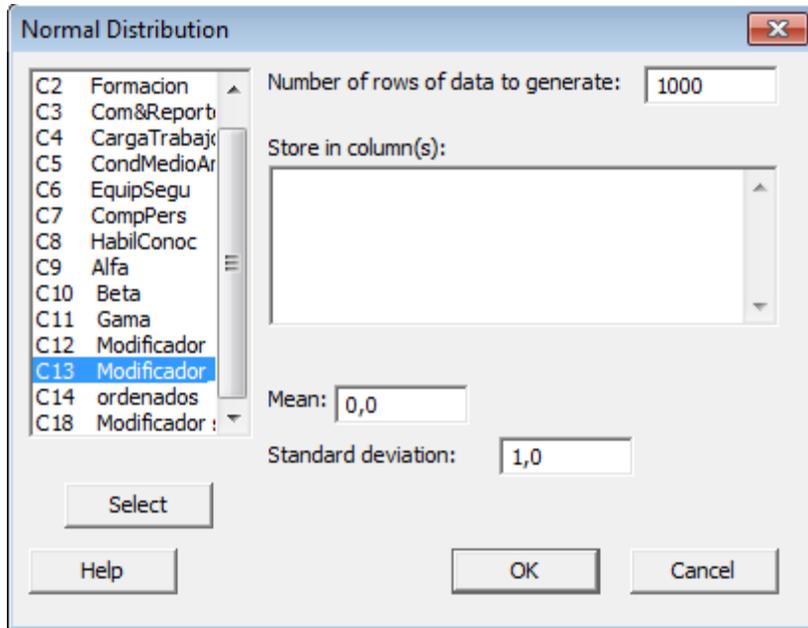
data third group of variables	independent variable				sensitivity index			
x = skills & knowledge	x₀	Δx	x₁	x₂	y₀	y₁	y₂	I_Σ
y = personal characteristic factor	2,00	0,50	1,50	2,50	1,66	1,61	1,9	34,93976
personal behaviour = 2,5	3,50	0,88	2,63	4,38	2,43	2	2,4	32,92181
	5,00	1,25	3,75	6,25	2,4	2,43	2,44	0,833333
	6,50	1,63	4,88	8,13	2,49	2,4	2,81	32,93173
	8,00	2,00	6,00	10,00	2,82	2,42	2,77	24,8227
MEDIA								25,29
x = personal behaviour	x₀	Δx	x₁	x₂	y₀	y₁	y₂	I_Σ
y = personal characteristic factor	2,00	0,50	1,50	2,50	1,66	1,61	1,9	34,93976
skills & knowledge = 2,5	3,50	0,88	2,63	4,38	2,43	2	2,4	32,92181
	5,00	1,25	3,75	6,25	2,4	2,43	2,49	5
	6,50	1,63	4,88	8,13	2,71	2,4	5,42	222,8782
	8,00	2,00	6,00	10,00	5,41	2,42	5,44	111,6451
MEDIA								81,48

Tabla G6.

data fourth group of variables	independent variable				sensitivity index			
x = organizational factor	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _Σ
y = fuzzy frequency modiefier	2,00	0,50	1,50	2,50	1,38	1,39	1,37	2,898551
job characte ristic factor = 3,3	3,50	0,88	2,63	4,38	1,35	1,37	1,35	2,962963
personal characteristic factor = 1,9	5,00	1,25	3,75	6,25	1,35	1,35	1,34	1,481481
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,34	1,35	1,33	2,985075
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,34	1,34	1,33	1,492537
MEDIA					2,36			
x = job characteristic factor	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _Σ
y = fuzzy frequency modiefier	2,00	0,50	1,50	2,50	1,4	1,41	1,39	2,857143
organizational factor = 2,19	3,50	0,88	2,63	4,38	1,37	1,38	1,37	1,459854
personal characteristic factor = 1,9	5,00	1,25	3,75	6,25	1,37	1,37	1,37	0
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,36	1,37	1,36	1,470588
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,36	1,37	1,36	1,470588
MEDIA					1,45			
x = organizational factor	x ₀	Δx	x ₁	x ₂	y ₀	y ₁	y ₂	I _Σ
y = fuzzy frequency modiefier	2,00	0,50	1,50	2,50	1,37	1,39	1,36	4,379562
organizational factor = 2,19	3,50	0,88	2,63	4,38	1,34	1,36	1,34	2,985075
job characteristic factor = 3,3	5,00	1,25	3,75	6,25	1,34	1,34	1,33	1,492537
	6,50	1,63	4,88	8,13	1,33	1,34	1,33	1,503759
	8,00	2,00	6,00	10,00	1,33	1,33	1,33	0
MEDIA					2,07			

Anexo H. Método de evaluación del desempeño de la empresa

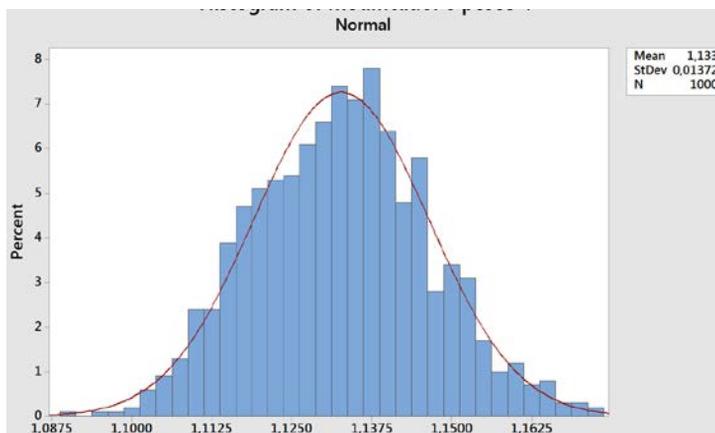
1. Se crean los números aleatorios de acuerdo con el número de repeticiones establecida en la metodología.



2. Se forman los posibles valores de entre los rangos establecidos de cada una de las variables establecidas

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	Contratacion	Formacion	Com&Reporte	CargaTrabajo	CondMedioAmb	EquipSegu	CompPers	HabilConoc	Alfa	Beta	Gama
1	9,7237	7,56151	8,10739	7,53634	7,56570	8,46124	9,18031	9,4536	8,10312	7,85443	9,31693
2	8,3757	9,79836	9,53449	8,84492	9,66047	9,36750	7,19907	9,8489	9,46105	9,29096	8,52400
3	8,5477	7,84692	9,39805	9,30964	9,72017	7,61476	7,88231	8,8332	8,29730	8,88152	8,35775
4	8,3953	7,66992	7,26448	9,95919	8,45182	7,92930	8,30300	9,4900	7,73390	8,78010	8,89650
5	8,4240	9,57331	7,56894	9,04829	7,66152	8,51134	7,05918	9,7120	8,94257	8,40705	8,38560
6	8,4010	7,59647	9,89618	8,36809	9,81501	7,94813	7,65553	8,0992	8,21731	8,71041	7,87734
7	7,0138	7,77877	7,83959	9,91707	8,92050	9,05585	7,85773	8,3729	7,63793	9,29781	8,11531
8	7,1002	8,87593	7,88806	8,30696	8,68807	9,55097	8,06092	7,8728	8,32320	8,84867	7,96686
9	8,7432	9,49734	8,12432	7,81052	9,59937	7,35459	8,52386	7,5998	9,07190	8,25483	8,06185
10	8,7270	8,03132	8,52166	9,13957	7,18446	7,57839	9,04698	7,7293	8,26853	7,96747	8,38812
11	7,2116	7,91801	9,81718	8,24359	8,47227	8,28155	9,83253	8,6366	8,15657	8,33247	9,23458
12	8,6976	7,33655	7,99527	8,33962	7,50206	9,71784	8,79103	9,1662	7,74051	8,51984	8,97864
13	7,1043	8,21007	7,86698	8,36062	9,50397	9,46104	9,14668	9,4631	7,92029	9,10854	9,30488
14	9,5547	8,94761	8,37202	7,88430	9,28321	9,17674	7,46733	8,0677	8,95391	8,78141	7,76751
15	8,3502	9,32919	9,51656	7,31845	7,69484	9,04245	9,95106	8,9885	9,17087	8,01858	9,46979
16	7,0226	9,92634	7,96327	7,83336	8,33455	9,72252	7,08585	9,1096	8,95298	8,63014	8,09773
17	8,2681	7,10950	8,34492	8,10161	7,22975	9,79695	7,17832	8,5854	7,58830	8,37610	7,88185
18	8,7109	7,82524	7,27560	8,94421	8,85315	9,36063	9,62537	9,7308	7,89244	9,05267	9,67809
19	9,5101	7,19936	9,58170	9,32102	9,41548	7,44863	7,49743	8,6937	8,13797	8,72837	8,09554
20	9,0046	7,27185	8,54988	9,67714	8,17633	7,73754	8,80692	8,0584	7,87401	8,53034	8,43268
21	8,8446	7,14710	7,60336	7,42781	9,85910	7,61606	8,40510	8,4813	7,57786	8,30099	8,44320
22	7,7716	7,99248	9,75997	8,86391	9,60221	8,11109	9,77165	8,4239	8,30180	8,85907	9,09777
23	8,0842	7,36841	9,20152	7,95063	7,83806	7,95723	7,38426	8,2375	7,87820	7,91531	7,81090
24	9,8273	9,67520	8,54194	7,84674	8,74708	7,34532	9,57426	8,3833	9,47897	7,97971	8,97876
25	7,3517	9,95629	7,82855	7,14438	7,58649	7,08272	9,91495	7,0516	9,00982	7,27120	8,48330

3. Se crea el grafico para obtener el valor de la media dependiendo el tipo de PDF establecido para obtener el valor del modificador



4. Se toma el valor de la media como el valor del modificador

Anexo I. Método de evaluación del desempeño de la empresa

II. Preguntas de las variables del factor organizacional

Subcontratación

Los accidentes que ocurren dentro de las empresas no sólo pasan al personal contratado directamente por la empresa, si no que muchas veces ocurren al personal sub-contratado a empresas externas. Por lo tanto, este parámetro se refiere a los criterios que una compañía establece al momento de contratar personal externo para asegurar que tengan la experiencia técnica y en seguridad suficiente para evitar accidentes. La empresa también debe asegurarse que antes de entrar en sus instalaciones el personal externo debe de haber recibido instrucciones de seguridad apropiadas.

Para poder evaluar este factor, y en base al documento “Managing contractors – a guide for employers” (HSE, 2011), se realizan las siguientes preguntas a las empresas:

1. La empresa siempre sabe quiénes se encuentran en las áreas de trabajo:
(a) Sí (b) La mayoría del tiempo (c) Ocasionalmente
2. ¿Ha ocurrido algún tipo de accidente con algunos de los empleados subcontratados?
(a) Sí (b) No lo sabe (c) No
3. ¿Se evalúan las competencias de los contratistas en materia de salud y seguridad antes de que entren a la empresa?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente
4. ¿Se revisan que los estándares de seguridad y salud de la empresa a contratar encajan con los de la empresa?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) A veces
5. ¿Se hace un plan para el trabajo del contratista y se evalúa el peligro en cada etapa del trabajo?
(a) Siempre (b) A veces (c) Alguna vez se ha hecho
6. ¿Se le informa a los contratistas de los peligros implicados en la planta y de los procedimientos de emergencia antes de comenzar las tareas?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) Rara vez se hace

7. ¿Se hace un seguimiento del progreso del trabajo asignado hasta que es terminado?
(a) Siempre (b) A veces (c) Rara vez se hace
8. Después del trabajo realizado, se habla con el contratista acerca del trabajo que se ha hecho, incluyendo aspectos seguridad y salud de los trabajadores?
(a) Siempre (b) Cuando es posible (c) Casi nunca

Formación

Este parámetro habla sobre la formación que la compañía ofrece a sus empleados para mejorar el conocimiento que poseen y así poder desarrollar las tareas que se le asignan adecuadamente, sobre todo aquellas que son específicas y de un grado de peligrosidad alto. La compañía debe de tener un programa de formación definido impartido por personal certificado y que debe de ser continuamente evaluado.

Para poder evaluar este factor y en base a los documentos de la “Occupational Health and Safety Assessment Series” (OHSAS, 2009) y la “International Labor Organization” (ILO, 2001) se realizan las siguientes preguntas a las empresas:

1. ¿La empresa cuenta con un programa de formación a sus empleados?
(a) Sí (b) Sí, pero no está implementado (c) No
2. ¿La empresa imparte formación a sus trabajadores dependiendo el tipo de trabajo o zona donde se desarrolle el trabajo?
(a) Sí (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente
3. ¿La formación que recibe el empleado es suficiente y adecuada a su tipo de trabajo?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente
4. ¿Cada cuánto se realiza la formación de los empleados?
(a) Una o más veces al año (b) Una en un periodo de 1-5 años (c) Una vez cada 5 años o más
5. ¿La formación incluye preparación en temas de: riesgo, equipamiento de seguridad, sistemas de emergencia, lenguaje e instrucción?
(a) Siempre (b) A veces (c) Alguna vez

6. ¿Las personas que imparten los cursos de formación a los empleados son personas formadas y certificadas?
- (a) Siempre (b) Usualmente (c) A veces
7. ¿Se hace una evaluación a los trabajadores periódica para comprobar los conocimientos adquiridos en la formación?
- (a) Siempre (b) A veces (c) Rara vez se hace
8. ¿El programa de formación a los empleados es actualizado al menos cada 3 años?
- (a) Sí (b) Se actualiza con menor frecuencia (c) Nunca se actualiza

12. Preguntas de las variables del factor de las características del trabajo

Gestión de la carga de trabajo

Este parámetro se refiere a la gestión de la cantidad de trabajo que se le asigna a cada empleado. Un exceso de horas de trabajo en un trabajador puede afectar en el rendimiento y desempeño de la tarea asignada. Es importante que la compañía tenga una planificación de los horarios de trabajo, turnos, descansos, y tiempo extra de los trabajadores. De esta manera, se podrá evitar la fatiga y efectos adversos en los empleados que pueden llegar a causar un incidente.

Para poder evaluar este factor y en base a la Directiva 93/104/CE y al Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo (NTP 455) se realizan las siguientes preguntas a las empresas:

1. ¿La empresa asegura que los trabajadores cumplan pero sobretodo no sobrepasen sus 48 horas máximas semanales de trabajo?
- (a) Sí (b) La mayoría del tiempo (c) Ocasionalmente
2. ¿La empresa involucra a sus empleados en la planificación de su horario de trabajo, turnos y descansos?
- (a) Sí (b) Casi nunca (c) No
3. ¿Los empleados que trabajan por turnos tienen por lo menos 12 horas de descanso entre sus turnos?
- (a) Siempre (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente

4. ¿La empresa tiene un control del tiempo extra realizado por los trabajadores asegurándose que no sobrepase de 12 horas a la semana?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) A veces

5. ¿Los trabajadores generalmente se notan con fatiga o cansancio durante su jornada de trabajo?
(a) Siempre (b) Ocasionalmente (c) Casi nunca

6. ¿Los empleados cuentan con 11 horas de descanso diario entre jornadas laborables?
(a) Siempre (b) A veces (c) Casi nunca

7. ¿Los empleados que trabajan más de 6 horas seguidas cuentan con una pausa dependiendo del convenio colectivo o la legislación nacional?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) Rara vez

8. ¿Cuándo el trabajo de un empleado no es satisfactorio o presenta problemas médicos, la empresa realiza una revisión de su horario de trabajo, turnos, descansos y tiempo extra realizado?
(a) Siempre (b) Cuando es posible (c) Casi nunca

Condiciones medioambientales

Este parámetro se refiere a las condiciones del lugar de trabajo como el ruido y las condiciones del aire. El ruido puede afectar la habilidad para desarrollar la tarea asignada. De acuerdo con el estándar OSHAS (*Occupational Health and Safety Assessment Serie*) (OHSAS 18001, 1999) si las condiciones de trabajo superan un ruido mayor a 90 dBA, el trabajo a realizar queda comprometido así como la salud del trabajador. Por otra parte la calidad del aire depende de varios parámetros como la humedad, temperatura, contaminantes y la ventilación. Unas condiciones pobres del aire pueden crear náuseas, dolores de cabeza o problemas de concentración que pueden causar un incidente. La EPA (*Environmental Protection Agency*) (EPA, 2009) establece un índice de calidad del aire (AQI) de escala de 0 a 500, en donde si los valores sobrepasan de 150, la calidad del aire es considerada no apta para el óptimo desarrollo del trabajo.

Para poder evaluar este factor y en base a la Directiva 2003/10/CE, Real Decreto 286/2006 y Real Decreto 486/1997, se hacen las siguientes preguntas a las empresas:

1. ¿La temperatura en los espacios tanto abiertos como cerrados de trabajo son generalmente muy elevadas o bajas, de manera que afectan a el trabajador, causándole fatiga, mareos o algún tipo de inconveniencia?
(a) Sí (b) La mayoría del tiempo (c) Casi nunca sucede

2. ¿En las zonas de trabajo el nivel de ruido es alto y la comunicación entre los trabajadores se dificulta?
(a) Sí (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente

3. ¿Suele suceder que los trabajadores tengan problemas de respiración debido a la calidad del aire por contaminantes en el área de trabajo?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) Casi nunca

4. ¿En lugar de trabajo existe iluminación suficiente tanto natural como artificial, por lo que el trabajador nunca se queja de falta de visibilidad?
(a) En todas las zonas de trabajo (b) En la mayoría de las zonas (c) En algunas de las zonas

5. ¿El área de trabajo no cuenta con un sistema de ventilación apropiado por lo cual el trabajador se queja de insuficiencia de aire?
(a) Nunca sucede (b) A veces sucede (c) Sucede repetidamente

6. ¿Los empleados se quejan continuamente por molestias en general causadas por algunos de los parámetros previamente mencionados (altas o bajas temperaturas, falta de aire, falta de iluminación, calidad del aire)?
(a) Siempre (b) Rara vez sucede (c) Casi nunca

7. ¿La empresa cuenta con equipamiento de detección de los parámetros que afectan las condiciones medioambientales en todas las zonas de proceso (medición de ruido, medición de contaminantes y ventilación, etc)?
(a) Sí (b) Algunos de ellos (c) Ninguno

8. ¿La empresa toma medidas en caso de que algún parámetro esté fuera de los límites establecidos?
(a) Siempre (b) A veces (c) Rara vez se hace

Equipamiento de Seguridad

Este parámetro se refiere al equipo de protección personal (EPI) que los empleados deben de llevar puesto en todo momento mientras se encuentren el área de proceso (gafas de seguridad, cascos, taponos de oído, guantes). También se refiere a los equipos de seguridad que la planta debe de tener como duchas, señalizaciones etc.. que deben de estar apropiadamente ditribuidos en toda la zona de proceso.

Para poder evaluar este factor y en base al Real Decreto 773/1997, Real Decreto 485/1997 y al Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo (NTP 455) se realizan las siguientes preguntas a las empresas:

1. ¿La empresa cuenta con el equipo de protección personal (EPI) adecuado (protectores de cabeza, oído, ojos y cara, manos y brazos, pies y piernas)?
(a) Sí (b) No lo sabe (c) No
2. ¿La empresa hace una revisión diaria que asegure que los trabajadores llevan el equipamiento de protección personal?
(a) Sí (b) Regularmente (c) Casi nunca
3. ¿En caso de pérdida o reducción de la eficacia protectora del EPI, la empresa lo reemplaza?
(a) Siempre (b) Casi siempre (c) Rara vez
4. ¿El equipo de protección personal responde a las condiciones existentes del lugar de trabajo y se adaptan a las condiciones anatómicas y fisiológicas del trabajador (ej. talla adecuada)?
(a) Si (b) Usualmente (c) Casi nunca
5. ¿Suceden incidentes en las zonas de trabajo porque el empleado no llevaba puesto algún equipo de protección personal?
(a) Nunca sucede (b) Muy espontáneamente (c) Frecuentemente
6. ¿Las zonas de trabajo dentro de la empresa cuentan con todas las señalizaciones necesarias tanto de prohibición, advertencia, obligación y de salvamento o socorro que llamen la atención, alerten o ayuden a los trabajadores a evitar los accidentes.
(a) Sí, en todo el lugar (b) En la mayoría de los lugares (c) En algunas zonas
7. ¿La zona de trabajo cuenta con todos los dispositivos de protección necesarios (detección de fugas de gas, detección de fuegos, lavaojos, duchas, extintores) y están ubicados en el lugar óptimo?
(a) Si (b) Alguno de ellos (c) Ninguno
8. ¿Se hace una inspección periódica para comprobar que las señalizaciones así como los dispositivos de seguridad estén en óptimas condiciones y se encuentren situados en sus lugares correspondientes.
(a) Siempre (b) A veces (c) Alguna vez

I3. Preguntas de las variables del factor de las características personales

Comportamiento Personal

Este parámetro se refiere a las actitudes, hábitos y personalidad del empleado que normalmente son fijas y no pueden ser cambiadas e incluye la atención, motivación que el trabajador le presta a su trabajo. Dentro de esta variable también se incluye la capacidad de trabajar en equipo.

Para evaluar este factor y de acuerdo con la definición de la “Health and Safety at Work” (HSE,2010), se realizan las siguientes preguntas a las empresas:

1. ¿El empleado demuestra que sabe trabajar en equipo al colaborar con otros trabajadores?
(a) Sí (b) Usualmente (c) Nunca
2. ¿El empleado sabe seguir instrucciones que se le ordenan y las cumple satisfactoriamente y a tiempo?
(a) Sí (b) Casi siempre (c) Muy ocasionalmente
3. ¿El empleado está atento cuando realiza sus tareas y no está distraído?
(a) Siempre (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente
4. ¿El empleado se muestra motivado en su trabajo?
(a) Sí (b) Usualmente (c) Casi nunca
5. ¿El empleado tiene buena memoria y recuerda todo el conocimiento adquirido, por lo que no repite errores previamente realizados?
(a) Sí (b) A veces (c) No
6. ¿Al empleado se le nota generalmente estresado y ha llegado a causar algún accidente por este motivo?
(a) Siempre (b) Alguna vez (c) Nunca
7. ¿El empleado realiza sus tareas en un tiempo superior al deseado dejando tareas inconclusas?
(a) Nunca sucede (b) Ocasionalmente (c) La mayoría del tiempo
8. ¿Al empleado le cuesta realizar las tareas asignadas cuando le son requeridas?
(a) La mayoría del tiempo (b) Ocasionalmente (c) La mayoría del tiempo

Habilidades y conocimiento

Este parámetro se refiere a la capacidad y competencia de los trabajadores para entender las tareas que se les asigna. El empleado debe tener un conocimiento mínimo acerca de los procesos químicos, equipo y seguridad. La falta de este conocimiento puede suponer un riesgo y como consecuencia un incidente potencial. También se incluye en este parámetro la experiencia que el trabajador va adquiriendo y como esto ayuda a los demás trabajadores

Para evaluar este factor y de acuerdo con la definición de la “Health and Safety at Work” (HSE,2010), se realizan las siguientes preguntas a las empresas:

1. ¿En la empresa ha ocurrido algún accidente debido a la falta de conocimiento de los empleados?

(a) Sí (b) Casi nunca (c) Nunca

2. ¿Los empleados que tienen experiencia ayudan a los nuevos empleados en el trabajo?

(a) Sí (b) Casi nunca (c) No

3. ¿Los empleados demuestran las habilidades necesarias en materia de seguridad cuando algún incidente ocurre?

(a) Siempre (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente

4. ¿El empleado demuestra dominio del conocimiento acerca del proceso en el que está involucrado?

(a) Si (b) La mayoría del tiempo (c) Ocasionalmente

5. Generalmente cuando se le da una instrucción al empleado, realiza la orden exitosamente

(a) Si (b) Casi nunca (c) Nunca

6. Cuando se presenta un problema, el empleado generalmente muestra tener las habilidades necesarias para resolverlos sin involucrar a otros mandos jerárquicos

(a) Siempre (b) Usualmente (c) Muy ocasionalmente

7. El empleado conoce bien el equipo del proceso y sabe manejarlo a la perfección (e.g. tanque, torre de destilación, etc)

(a) Sí (b) Más o menos (c) Lo desconoce

Anexo J. Respuestas del método de evaluación para los cuatro casos de estudio

J1. Respuestas para caso de estudio A

Pregunta	Factores Organizacionales								
	Subcontratación			Formación			Comunicación e Informe		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1			2		5				2
2		5				2		5	
3			2			2		5	
4			2			2		5	
5			2			2		5	
6			2		5			5	
7			2			2			2
8			2		5			5	
Suma:	19			25			34		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Pobres			Condiciones Pobres			Condiciones Medias		

Pregunta	Factores de las características del trabajo								
	Gestión de carga de trabajo			Condiciones mediambientales			Equipamiento de seguridad		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1		5			5			5	
2			2		5				2
3		5				8			2
4		5			5				2
5		5		8					2
6		5		2					2
7		5			5			5	
8			2		5				2
Suma:	34			43			22		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Medias			Condiciones Medias			Condiciones Pobres		

Pregunta	Factores de las características personales					
	Habilidades & conocimiento			Comportamiento personal		
	a	b	c	a	b	c
1			2	2		
2		5			5	
3		5				2
4			2			2
5			2		5	
6		5				2
7		5			5	
8		5			5	
Suma:	31			28		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Pobres			Condiciones Pobres		

J2. Respuestas para caso de estudio B

Pregunta	Factores Organizacionales								
	Subcontratación			Formación			Comunicación e Informe		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	8			8			8		
2	8			8			8		
3	8			8				5	
4	8			8			8		
5	8					8		5	
6	8			8			8		
7	8			8			8		
8	8			8			8		
Suma:	64			64			58		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes		

Factores de las características del trabajo									
Pregunta	Gestión de carga de trabajo			Condiciones mediambientales			Equipamiento de seguridad		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	8					8	8		
2	8					8	8		
3	8					8	8		
4	8			8			8		
5			8	8			8		
6	8					8	8		
7	8			8			8		
8	8			8			8		
Suma:	64			64			64		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes		

Factores de las características personales						
Pregunta	Habilidades & conocimiento			Comportamiento personal		
	a	b	c	a	b	c
1	8				5	
2		5		8		
3	8			8		
4	8			8		
5		5			5	
6			2		5	
7	8			8		
8	8				5	
Suma:	52			52		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes		

J3. Respuestas para caso de estudio C

Pregunta	Factores Organizacionales								
	Subcontratación			Formación			Comunicación e Informe		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1		5			5			5	
2		5			5			5	
3			2		5			5	
4			2			2		5	
5		5				2		5	
6			2		5			5	
7			2		5			5	
8			2		5			5	
25	25			34			40		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Pobres			Condiciones Medias			Condiciones Medias		

Pregunta	Factores de las características del trabajo								
	Gestión de carga de trabajo			Condiciones medioambientales			Equipamiento de seguridad		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1		5			5			5	
2		5			5				2
3		5				8		5	
4		5			5			5	
5		5		8				5	
6		5		2					2
7		5			5			5	
8		5			5				2
Suma:	40			43			31		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Medias			Condiciones Medias			Condiciones Pobres		

Pregunta	Factores de las características personales					
	Habilidades & conocimiento			Comportamiento personal		
	a	b	c	a	b	c
1	2			2		
2		5			5	
3			2			2
4			2			2
5		5			5	
6			2			2
7		5			5	
8		5				2
Suma:	28			25		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Pobres			Condiciones Pobres		

J4. Respuestas para caso de estudio D

Pregunta	Factores Organizacionales								
	Subcontratación			Formación			Comunicación e Informe		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	8			8			8		
2	8			8			8		
3	8			8				5	
4	8			8			8		
5	8					8		5	
6	8			8			8		
7	8			8			8		
8	8			8			8		
Suma:	64			64			58		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes		

Pregunta	Factores de las características del trabajo								
	Gestión de carga de trabajo			Condiciones mediambientales			Equipamiento de seguridad		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	8					8	8		
2	8					8	8		
3	8					8	8		
4	8			8			8		
5			8	8			8		
6	8					8	8		
7	8			8			8		
8	8			8			8		
Suma:	64			64			64		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes			Condiciones Excelentes		

Pregunta	Factores de las características personales					
	Habilidades & conocimiento			Comportamiento personal		
	a	b	c	a	b	c
1	8					2
2		5		8		
3	8			8		
4		5		8		
5		5				2
6			2		5	
7		5		8		
8	8				5	
Suma:	46			46		
Conjunto difuso / Condición	Condiciones Medias			Condiciones Medias		

Anexo K. Frecuencias de accidentes del caso de estudio 4

Zona	LOC	Accidente final	F. Finales ACR (año ⁻¹)	M. Difuso	Frecuencias difusas (año ⁻¹)	M. MC	Frecuencias MC (año ⁻¹)
Tuberías asociada a la cubeta	G1	Llamarada	$3,39 \cdot 10^{-6}$	1,22	$4,14 \cdot 10^{-6}$	1,13	$3,83 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$3,73 \cdot 10^{-6}$		$4,55 \cdot 10^{-6}$		$4,21 \cdot 10^{-6}$
	G2	Incendio de charco	$1,12 \cdot 10^{-7}$		$1,37 \cdot 10^{-7}$		$1,27 \cdot 10^{-7}$
		Dispersión tóxica	$1,62 \cdot 10^{-6}$		$1,98 \cdot 10^{-6}$		$1,83 \cdot 10^{-6}$
	G3	Llamarada	$2,47 \cdot 10^{-4}$		$3,01 \cdot 10^{-4}$		$2,79 \cdot 10^{-4}$
		Incendio de charco	$2,72 \cdot 10^{-4}$		$3,32 \cdot 10^{-4}$		$3,07 \cdot 10^{-4}$
Bombas asociada al a cubeta	G1	Incendio de charco	$3,70 \cdot 10^{-8}$	1,22	$4,51 \cdot 10^{-8}$	1,13	$4,18 \cdot 10^{-8}$
		Dispersión tóxica	$5,33 \cdot 10^{-7}$		$6,50 \cdot 10^{-7}$		$6,02 \cdot 10^{-7}$
Nave de tratamiento del producto final	G1	Llamarada	$4,03 \cdot 10^{-6}$	1,22	$4,92 \cdot 10^{-6}$	1,13	$4,55 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$4,43 \cdot 10^{-6}$		$5,40 \cdot 10^{-6}$		$5,01 \cdot 10^{-6}$
	G2	Llamarada	$4,03 \cdot 10^{-6}$		$4,92 \cdot 10^{-6}$		$4,55 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$4,43 \cdot 10^{-6}$		$5,40 \cdot 10^{-6}$		$5,01 \cdot 10^{-6}$
Nave de producción	G1	Llamarada	$1,21 \cdot 10^{-5}$	1,22	$1,48 \cdot 10^{-5}$	1,13	$1,37 \cdot 10^{-5}$
		Incendio de charco	$1,33 \cdot 10^{-5}$		$1,62 \cdot 10^{-5}$		$1,50 \cdot 10^{-5}$
	G2	Dardo de fuego	$6,25 \cdot 10^{-6}$		$7,63 \cdot 10^{-6}$		$7,06 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$4,38 \cdot 10^{-6}$		$5,34 \cdot 10^{-6}$		$4,95 \cdot 10^{-6}$
Nave de producción	G1	Incendio de charco	$8,00 \cdot 10^{-7}$	1,22	$9,76 \cdot 10^{-7}$	1,13	$9,04 \cdot 10^{-7}$
		Dispersión tóxica	$1,15 \cdot 10^{-5}$		$1,40 \cdot 10^{-5}$		$1,30 \cdot 10^{-5}$
	G2	Incendio de charco	$8,00 \cdot 10^{-7}$		$9,76 \cdot 10^{-7}$		$9,04 \cdot 10^{-7}$
		Dispersión tóxica	$1,15 \cdot 10^{-5}$		$1,40 \cdot 10^{-5}$		$1,30 \cdot 10^{-5}$

	G3	BLEVE	$2,00 \cdot 10^{-7}$		$2,44 \cdot 10^{-7}$		$2,26 \cdot 10^{-7}$
		Llamarada	$5,60 \cdot 10^{-7}$		$6,83 \cdot 10^{-7}$		$6,33 \cdot 10^{-7}$
		Incendio de charco	$7,60 \cdot 10^{-7}$		$9,27 \cdot 10^{-7}$		$8,59 \cdot 10^{-7}$
Nave almacenaje	G1	BLEVE	$2,00 \cdot 10^{-6}$	1,22	$2,44 \cdot 10^{-6}$	1,13	$2,26 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$2,40 \cdot 10^{-6}$		$2,93 \cdot 10^{-6}$		$2,71 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$4,40 \cdot 10^{-6}$		$5,37 \cdot 10^{-6}$		$4,97 \cdot 10^{-6}$

Zona	LOC	Accidente final	F. Finales ACR (año ⁻¹)	M. Difuso	Frecuencias difusas (año ⁻¹)	M. MC	Frecuencias MC (año ⁻¹)
Almacenaje materia prima	G1	Dispersión tóxica	$3,68 \cdot 10^{-9}$	1,22	$4,49 \cdot 10^{-9}$	1,13	$4,16 \cdot 10^{-9}$
Almacenaje materia prima (tóxicos)	G2	Dispersión tóxica	$4,97 \cdot 10^{-9}$	1,22	$6,06 \cdot 10^{-9}$	1,13	$5,62 \cdot 10^{-9}$
Nave de procesos	G1	Dispersión tóxica	$2,88 \cdot 10^{-6}$	1,22	$3,51 \cdot 10^{-6}$	1,13	$3,25 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$2,00 \cdot 10^{-7}$		$2,44 \cdot 10^{-7}$		$2,26 \cdot 10^{-7}$
	G2	Dispersión tóxica	$2,88 \cdot 10^{-6}$		$3,51 \cdot 10^{-6}$		$3,25 \cdot 10^{-6}$
		Incendio de charco	$2,00 \cdot 10^{-7}$		$2,44 \cdot 10^{-7}$		$2,26 \cdot 10^{-7}$
Almacenaje de ácido clorhídrico, hidrogeno y acetileno	G1	Dispersión tóxica	$1,50 \cdot 10^{-6}$	1,22	$1,83 \cdot 10^{-6}$	1,13	$1,70 \cdot 10^{-6}$
	G2	Dispersión tóxica	$1,50 \cdot 10^{-6}$		$1,83 \cdot 10^{-6}$		$1,70 \cdot 10^{-6}$
	G1	BLEVE	$2,00 \cdot 10^{-6}$		$2,44 \cdot 10^{-6}$		$2,26 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$2,40 \cdot 10^{-6}$		$2,93 \cdot 10^{-6}$		$2,71 \cdot 10^{-6}$
	G2	Dardo de fuego	$2,00 \cdot 10^{-6}$		$2,44 \cdot 10^{-6}$		$2,26 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$2,40 \cdot 10^{-6}$		$2,93 \cdot 10^{-6}$		$2,71 \cdot 10^{-6}$
	G2	BLEVE	$6,00 \cdot 10^{-7}$		$7,32 \cdot 10^{-7}$		$6,78 \cdot 10^{-7}$
		Llamarada	$7,20 \cdot 10^{-7}$		$8,78 \cdot 10^{-7}$		$8,14 \cdot 10^{-7}$

Línea de gas natural	G1	Dardo de fuego	$2,00 \cdot 10^{-6}$	1,22	$2,44 \cdot 10^{-6}$	1,13	$2,26 \cdot 10^{-6}$
		Llamarada	$5,60 \cdot 10^{-6}$		$6,83 \cdot 10^{-6}$		$6,33 \cdot 10^{-6}$
	G2	Dardo de fuego	$1,00 \cdot 10^{-5}$		$1,22 \cdot 10^{-5}$		$1,13 \cdot 10^{-5}$
		Llamarada	$2,80 \cdot 10^{-5}$		$3,42 \cdot 10^{-5}$		$3,16 \cdot 10^{-5}$
	G1	Dardo de fuego	$2,34 \cdot 10^{-5}$		$2,85 \cdot 10^{-5}$		$2,64 \cdot 10^{-5}$
		Llamarada	$6,55 \cdot 10^{-5}$		$7,99 \cdot 10^{-5}$		$7,40 \cdot 10^{-5}$
	G2	Dardo de fuego	$1,56 \cdot 10^{-4}$		$1,90 \cdot 10^{-4}$		$1,76 \cdot 10^{-4}$
		Llamarada	$4,37 \cdot 10^{-4}$		$5,33 \cdot 10^{-4}$		$4,94 \cdot 10^{-4}$
Grupos de fríos	G1	Dispersión tóxica	$1,50 \cdot 10^{-6}$	1,22	$1,83 \cdot 10^{-6}$	1,13	$1,70 \cdot 10^{-6}$
	G2	Dispersión tóxica	$1,50 \cdot 10^{-6}$		$1,83 \cdot 10^{-6}$		$1,70 \cdot 10^{-6}$
	G3	Dispersión tóxica	$3,00 \cdot 10^{-5}$		$3,66 \cdot 10^{-5}$		$3,39 \cdot 10^{-5}$
Grupos de fríos	G1	Dispersión tóxica	$1,87 \cdot 10^{-5}$	1,22	$2,28 \cdot 10^{-5}$	1,13	$2,11 \cdot 10^{-5}$
		Incendio de charco	$1,30 \cdot 10^{-6}$		$1,59 \cdot 10^{-6}$		$1,47 \cdot 10^{-6}$
	G2	Dispersión tóxica	$1,87 \cdot 10^{-5}$		$2,28 \cdot 10^{-5}$		$2,11 \cdot 10^{-5}$
		Incendio de charco	$1,30 \cdot 10^{-6}$		$1,59 \cdot 10^{-6}$		$1,47 \cdot 10^{-6}$
	G1	Dispersión tóxica	$9,35 \cdot 10^{-6}$		$1,14 \cdot 10^{-5}$		$1,06 \cdot 10^{-5}$
		Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$7,93 \cdot 10^{-7}$		$7,35 \cdot 10^{-7}$
	G2	Dispersión tóxica	$9,35 \cdot 10^{-6}$		$1,14 \cdot 10^{-5}$		$1,06 \cdot 10^{-5}$
		Incendio de charco	$6,50 \cdot 10^{-7}$		$7,93 \cdot 10^{-7}$		$7,35 \cdot 10^{-7}$

Anexo L. Cálculo de las consecuencias de los accidentes

L1. Caso de estudio A

Se muestran en forma de tablas, los cálculos de las magnitudes de las consecuencias para los dos eventos de pérdida de contención restantes (G2a y G3a) correspondientes al tanque de almacenamiento de butano. Así como los correspondientes cálculos de magnitudes de consecuencias del tanque de propano.

Tabla L1.1. Consecuencias para G2a del tanque de almacenamiento de butano

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G2a	Capacidad de operación normal del tanque (kg): 62.668 (50% del volumen útil)	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 39 Alcance LC50 (m): 58 Alcance LC1 (m): 76
	Dardo de fuego	Alcance LC100 (m): 52,5/6,3 Alcance LC50 (m): 52,5/6,3 Alcance LC1 (m): 52,5/6,3
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/5 (m): 207 Semi anchura de la pluma D/5 (m): 66
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 549 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 210
	Explosión	Alcance LC100 D/5 (m): 52
Alcance LC100 F/1,7 (m): 98		

Tabla L1.2. Consecuencias para G3a del tanque de almacenamiento de butano

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G3a	Capacidad de operación normal del tanque (kg): 62.668 (50% del volumen útil)	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 3 Alcance LC50 (m): 6 Alcance LC1 (m): 9
	Dardo de fuego	Alcance LC100 (m): 12,5/1,3 Alcance LC50 (m): 12,5/1,3 Alcance LC1 (m): 12,5/1,3
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/5 (m): 21 Semi anchura de la pluma D/5 (m): 5
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 44 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 24

Tabla L1.3. Consecuencias para G1a del tanque de almacenamiento de propano

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G1a	Capacidad de operación normal del tanque (kg): 30.023 (50% del volumen útil)	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 22 Alcance LC50 (m): 35 Alcance LC1 (m): 47
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/5 (m): 482 Semi anchura de la pluma D/5 (m): 154 Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 410 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 200
	Explosión	Alcance LC100 D/5 (m): 96
		Alcance LC100 F/1,7 (m): 96
Bola de fuego	Alcance LC100 (m): 165 Alcance LC50 (m): 203 Alcance LC1 (m): 332	

Tabla L1.4. Consecuencias para G2a del tanque de almacenamiento de propano

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G2a	Capacidad de operación normal del tanque (kg): 30.023 (50% del volumen útil)	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 7 Alcance LC50 (m): 13 Alcance LC1 (m): 19
	Dardo de fuego	Alcance LC100 (m): 66/7,9 Alcance LC50 (m): 66/7,9 Alcance LC1 (m): 66/7,9
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/5 (m): 147 Semi anchura de la pluma D/5 (m): 38
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 435 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 290
Explosión	Alcance LC100 D/5 (m): 38	
	Alcance LC100 F/1,7 (m): 83	

Tabla L1.5. Consecuencias para G3a del tanque de almacenamiento de propano

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G3a	Capacidad de operación normal del tanque (kg): 30.023 (50% del volumen útil)	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 0,8 Alcance LC50 (m): 0,8 Alcance LC1 (m): 0,8
	Dardo de fuego	Alcance LC100 (m): 25/2,9 Alcance LC50 (m): 25/2,9 Alcance LC1 (m): 25/2,9
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/5 (m): 30 Semi anchura de la pluma D/5 (m): 5,5
Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 81 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 43		

L2. Caso de estudio B

Se muestran en forma de tablas, los cálculos de las magnitudes de las consecuencias para los dos eventos de pérdida de contención restantes (G2b y G3b) correspondientes al tanque de etileno criogénico. Así como los correspondientes cálculos de magnitudes de consecuencias del tanque de almacenamiento aereo de GLP.

Tabla L2.1. Consecuencias para G3b del tanque de almacenamiento de etileno criogénico

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G3b	Producto: Etileno criogénico	
	Cantidad máxima del tanque (kg): 24.00	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 3,5 Alcance LC50 (m): 7 Alcance LC1 (m): 10,5
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/4,8 (m): 22 Semi anchura de la pluma D/4,8 (m): 4
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 53 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 23,5
	Explosión (UVCE)	Alcance LC100 D/4,8 (m): No sucede
Alcance LC100 F/1,7 (m): No sucede		
Dardo de fuego	Alcance LC100 (m): 20/2,5 Alcance LC50 (m): 20/2,5 Alcance LC1 (m): 20/2,5	

Tabla L2.2. Consecuencias para G1b del tanque de almacenamiento de GLP

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G1b	Producto: R-152a (1,1-Difluoroetano)	
	Cantidad máxima del tanque (kg): 46.300	
	Capacidad de operación normal del tanque: 85% de la capacidad	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 22 Alcance LC50 (m): 25 Alcance LC1 (m): 41
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/4,8 (m): 180 Semi anchura de la pluma D/4,8 (m): 71
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 242 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 230
Explosión (UVCE)	Alcance LC100 D/4,8 (m): 52	
	Alcance LC100 F/1,7 (m): 56	
BLEVE	Massa involucrada (kg): 46.300 Alcance LC100 (m): 106	

		Alcance LC50 (m): 106 Alcance LC1 (m): 191
--	--	---

Tabla L2.3. Consecuencias para G2b del tanque de almacenamiento de GLP

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G2b	Producto: R-152a (1,1-Difluoroetano) Cantidad máxima del tanque (kg): 46.300 Capacidad de operación normal del tanque: 85% de la capacidad	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 18 Alcance LC50 (m): 20 Alcance LC1 (m): 35
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/4,8 (m): 75 Semi anchura de la pluma D/4,8 (m): 26,5
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 208 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 155
	Explosión (UVCE)	Alcance LC100 D/4,8 (m): 24
		Alcance LC100 F/1,7 (m): 50
Dardo de fuego	Alcance LC100 (m): 62/8 Alcance LC50 (m): 62/8 Alcance LC1 (m): 62/8	

Tabla L2.4. Consecuencias para G2b del tanque de almacenamiento de GLP

INICIADOR	DATOS DEL TANQUE	
G3b	Producto: R-152a (1,1-Difluoroetano) Cantidad máxima del tanque (kg): 46.300 Capacidad de operación normal del tanque: 85% de la capacidad	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 3,5 Alcance LC50 (m): 4 Alcance LC1 (m): 8
	Llamarada	Alcance máximo LEL D/4,8 (m): 11 Semi anchura de la pluma D/4,8 (m): 3
		Alcance máximo LEL F/1,7 (m): 27 Semi anchura de la pluma F/1,7 (m): 14
	Explosión (UVCE)	Alcance LC100 D/4,8 (m): No sucede
		Alcance LC100 F/1,7 (m): No sucede
Dardo de fuego	Alcance LC100 (m): 21/2,6 Alcance LC50 (m): 21/2,6 Alcance LC1 (m): 21/2,6	

L3. Caso de estudio C

Se muestran en forma de tablas, los cálculos de las magnitudes de las consecuencias para los dos eventos de pérdida de contención restantes (G2b y G3b) correspondientes a la zona de almacenamiento de formol. Así como los correspondientes cálculos de magnitudes de consecuencias de la zona de almacenamiento ácido acético.

Tabla L3.1. Consecuencias para G2c del tanque de almacenamiento de formol

LOC	Datos del tanque	
G2c	<u>Producto:</u> Formol - Volumen (m ³): 30 (70% ple) <u>Dimensiones de la cubeta de retención:</u> - Superficie total (m ²): 211 - Superficie útil (m ²): 158,2 - Altura (cm): 60	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Dispersión tóxica	<u>Meteorología D/4,8</u> Alcance LC99 (L/A) (m): 8/3 Alcance LC50 (L/A) (m): 15/5 Alcance C1 (L/A) (m): 27/9
		<u>Meteorología F/1,5</u> Alcance LC99 (L/A) (m): 28/5 Alcance LC50 (L/A) (m): 51/9 Alcance LC1 (L/A) (m): 92/16

Tabla L3.2. Consecuencias para G3c del tanque de almacenamiento de formol

LOC	Datos del tanque	
G3c	<u>Producto:</u> Formol - Volumen (m ³): 30 (70% ple) <u>Dimensiones de la cubeta de retención:</u> - Superficie total (m ²): 211 - Superficie útil (m ²): 158,2 - Altura (cm): 60	
	ACCIDENTEE	AREAS LETALES
	Dispersión tóxica	<u>Meteorología D/4,8</u> Alcance LC99 (L/A) (m): 3/1 Alcance LC50 (L/A) (m): 5/2 Alcance LC1 (L/A) (m): 9/3
		<u>Meteorología F/1,5</u> Alcance LC99 (L/A) (m): 9/2 Alcance LC50 (L/A) (m): 17/3 Alcance LC1 (L/A) (m): 30/5

Tabla L3.3. Consecuencias para G1c del tanque de almacenamiento de ácido acético

LOC	Datos del tanque	
G1c	<u>Producto:</u> Ácido acético - Volumen (m ³): 35 (70% ple) <u>Dimensiones de la cubeta de retención:</u> - Superficie (m ²): 164,8 - Altura (cm): 60	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC99 (L/A) (m): 7 Alcance LC50 (L/A) (m): 8 Alcance LC1 (L/A) (m): 13
	Llamarada	Alcance máximo LEL 4,8D (m): <10 Semi anchura de la pluma 4,8D (m): - - Alcance máximo LEL 1,5F (m): <10 Semi anchura de la pluma 1,5F (m): --

Tabla L3.4. Consecuencias para G2c del tanque de almacenamiento de ácido acético

LOC	Datos del tanque	
G2c	<u>Producto:</u> Ácido acético - Volum (m ³): 35 (70% ple) <u>Dimensiones de la cubeta de retención:</u> - Superficie (m ²): 164,8 - Altura (cm): 60	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC99 (L/A) (m): 7 Alcance LC50 (L/A) (m): 8 Alcance LC1 (L/A) (m): 13
	Llamarada	Alcance máximo LEL 4,8D (m): <10 Semi anchura de la pluma 4,8D (m): -- Alcance máximo LEL 1,5F (m): <10 Semi anchura de la pluma 1,5F (m): --

Tabla L3.5. Consecuencias para G3c del tanque de almacenamiento de ácido acético

LOC	Datos del tanque	
G3c	<u>Producto:</u> Ácido acético - Volumen (m ³): 35 (70% ple) <u>Dimensiones de la cubeta de retención:</u> - Superficie (m ²): 164,8 - Altura (cm): 60	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC99 (L/A) (m): 4 Alcance LC50 (L/A) (m): 4 Alcance LC1 (L/A) (m): 8
	Llamarada	Alcance máximo LEL 4,8D (m): <10 Semi anchura de la pluma 4,8D (m): -- Alcance máximo LEL 1,5F (m): <10 Semi anchura de la pluma 1,5F (m): --

L4. Caso de estudio D

Se muestran en forma de tablas, los cálculos de las magnitudes de las consecuencias para los dos eventos de pérdida de contención restantes (G2d) correspondientes a la zona de almacenamiento de metanol. Así como los correspondientes cálculos de magnitudes de consecuencias de la zona de almacenamiento acetona.

Tabla L4.1. Consecuencias para G2d de zona de almacenamiento metanol

LOC	Datos del tanque	
G1d	<u>Producto:</u> metanol <u>Temperatura de almacenaje (°C):</u> 14,3 <u>Presión de almacenaje (bar abs.):</u> atmosférica <u>Características del tanque:</u> - Longitud (m): 4 - Volumen (m ³): 38	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (m): 0,73 Alcance LC50 (m): 0,73 Alcance LC1 (m): 1,73
	Dispersion tóxica.	<u>Meteorología 4,8D</u> Alcance LC99 (m): NA Alcance LC50 (m): NA Alcance LC1 (m): NA
		<u>Meteorología 1,5F</u> Alcance LC99 (m): NA Alcance LC50 (m): NA Alcance LC1 (m): NA

Tabla L4.2. Consecuencias para G1d de zona de almacenamiento de acetona

LOC	Datos del tanque	
G1d	<u>Producto:</u> acetona <u>Temperatura de almacenaje (°C):</u> 56 <u>Presión de almacenaje (bar abs.):</u> atmosférica <u>Características del tanque:</u> - Longitud (m): 0,8 - Volumen (m ³):4	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (L/A) (m): 4,4 Alcance LC50 (L/A) (m): 8,7 Alcance LC1 (L/A) (m): 13,3
	Dispersion tóxica.	Alcance máximo LEL 4,8D (m): 14 Semi anchura de la pluma 4,8D (m): 2,8 Alcance máximo LEL 1,5F (m): 30 Semi anchura de la pluma 1,5F (m): 16,9

Tabla L4.3. Consecuencias para G2d de zona de almacenamiento de acetona

LOC	Datos del tanque	
G2c	<u>Producto:</u> acetona <u>Temperatura de almacenaje (°C):</u> 56 <u>Presión de almacenaje (bar abs.):</u> atmosférica <u>Características del tanque:</u> - Longitud (m): 0,8 - Volumen (m ³):4	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC100 (L/A) (m): 0,6 Alcance LC50 (L/A) (m): 1,2 Alcance LC1 (L/A) (m): 2,3
	Llamarada	Alcance máximo LEL 4,8D (m): NA Semi anchura de la pluma 4,8D (m): - Alcance máximo LEL 1,5F (m): 11 Semi anchura de la pluma 1,5F (m): 5,2

Tabla L4.1. Consecuencias para G1d de zona residual almacenamiento de ácido acético

LOC	Datos del tanque	
G2c	<u>Producto:</u> acetona <u>Temperatura de almacenaje (°C):</u> 56 <u>Presión de almacenaje (bar abs.):</u> atmosférica <u>Características del tanque:</u> - Longitud (m): 5,6 - Volumen (m ³):8	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC99 (L/A) (m): 9,2 Alcance LC50 (L/A) (m): 17,6 Alcance LC1 (L/A) (m): 25,4
	Llamarada	Alcance máximo LEL 4,8D (m): 11 Semi anchura de la pluma 4,8D (m): 9,2 Alcance máximo LEL 1,5F (m): 21 Semi anchura de la pluma 1,5F (m): 9,2

Tabla L4.1. Consecuencias para G2d de zona residual almacenamiento de ácido acético

LOC	Datos del tanque	
G2c	<u>Producto:</u> acetona <u>Temperatura de almacenaje (°C):</u> 56 <u>Presión de almacenaje (bar abs.):</u> atmosférica <u>Características del tanque:</u> - Longitud (m): 5,6 - Volumen (m ³):8	
	ACCIDENTE	AREAS LETALES
	Incendio de charco	Alcance LC99 (L/A) (m): 4,4 Alcance LC50 (L/A) (m): 8,8 Alcance LC1 (L/A) (m): 13,4
	Llamarada	Alcance máximo LEL 4,8D (m): 11 Semi anchura de la pluma 4,8D (m): -- Alcance máximo LEL 1,5F (m): 21 Semi anchura de la pluma 1,5F (m): 9,4