

El Juicio de Expertos

CSN

Colección
Otros Documentos
18.1999

CSN

CONSEJO DE
SEGURIDAD NUCLEAR

El Juicio de Expertos

Ricardo Bolado, Jesús Ibáñez y Alfredo Lantarón

Colección
Otros Documentos CSN
Referencia: ODE-04.08

Los autores desean agradecer al Consejo de Seguridad Nuclear haberles brindado la oportunidad de aplicar sus conocimientos en una primera experiencia piloto de juicio de expertos. Especialmente desean expresar su agradecimiento a D. Agustín Alonso y D. José Ignacio Villadoniga por su confianza en nuestro grupo de investigación. También desean agradecer a la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, y en particular a D. Jesús Alonso y D. Pedro Carboneras, su apoyo en nuestro primer contacto con este campo del conocimiento.

© Copyright 1998. Consejo de Seguridad Nuclear

Publicado y distribuido por:
Consejo de Seguridad Nuclear
Justo Dorado, 11. 28040 Madrid
<http://www.csn.es>
Peticones@csn.es

Imprime: Neografis, S. L.

ISBN: 84-95341-05-0
Depósito Legal: M. 49.395-1999

Impreso en papel ecológico

Índice

Prólogo	5
Introducción	9
I. Necesidad del Juicio de Expertos. Antecedentes	15
I.1. Tipos de incertidumbre	18
I.2. Uso del Juicio de Expertos	19
I.3. Ventajas e inconvenientes de los procesos formales de Juicio de Expertos	20
I.4. Aplicaciones de procesos formales de Juicio de Expertos	23
I.5. Observaciones sobre el uso e interpretación del Juicio de Expertos	26
I.6. Ejemplos de aplicaciones de Juicio de Expertos	27
II. Un marco teórico para el Juicio de Expertos	35
II.1. Los axiomas de Kolmogorov	37
II.2. La interpretación clásica de la probabilidad	38
II.3. La interpretación frecuentista de la probabilidad	38
II.4. La interpretación bayesiana de la probabilidad	40
III. Los sesgos en los juicios y la evaluación de los expertos	55
III.1. Los sesgos del conocimiento	58
III.2. Los sesgos motivacionales	69
III.3. La evaluación de los expertos	69
III.4. El comportamiento de los expertos	75
IV. Técnicas y protocolos de Juicio de Expertos	77
IV.1. Técnicas de asignación de probabilidades y funciones de distribución	80
IV.2. Protocolos de Juicio de Expertos	94

V. Combinación del Juicio de Expertos	113
V.1. Características generales de la combinación de Juicio de Expertos	115
V.2. Combinación de grupo	118
V.3. Combinación analítica	121
VI. El proyecto comunitario BE-EJT'S	129
VI.1. Resultados de la fase previa	132
VI.2. Resultados de la fase 1	133
VI.3. Resultados de la fase 2	138
VII. Conclusiones y recomendaciones	139
Referencias bibliográficas	145
Apéndices	157
A. La combinación bayesiana del Juicio de Expertos	159
B. El protocolo CTN del Juicio de Expertos	177
C. Evaluación de la combustión del hidrógeno en un reactor PWR evolutivo genérico	189
D. Planteamiento y análisis del problema de deflagración y detonación en el IRWST. Experto A: Miguel Angel Jiménez García	221
E. Planteamiento y análisis del problema de deflagración y detonación en el IRWST. Experto B: Juan Manuel Martín-Valdepeñas Yagüe	233

Prólogo

Prólogo

Entre los famosos *Pensamientos* de Pascal se encuentra una reflexión sobre el *conocimiento* y cómo lograrlo. El sabio distingue entre dos procesos primarios para conseguir tal objetivo: el que se basa en el sentimiento o la percepción y el que tiene sus fundamentos en la razón. Los que practican el primero “*quieren entenderlo todo de golpe*” y no se preocupan por los principios en los que se basa lo que intentan conocer. Los que razonan sólo por principios no ejercitan los sentimientos y pierden la posibilidad de “*verlo todo de golpe*”. Excluir la razón y basarse sólo en los sentimientos y excluir los sentimientos y basarse sólo en la razón son dos extremos que Pascal no recomienda.

El ejercicio que han realizado Ricardo Bolado, Jesús Ibáñez y Alfredo Lantarón en su documento sobre el *Juicio de Expertos* trata precisamente de cómo es posible destilar el conocimiento -y los sentimientos- de los *expertos* para el beneficio de terceros y de la sociedad y de qué forma es posible conjugar a tal efecto la *razón* con los *sentimientos*. Los letrados, expertos y peritos, son figuras legendarias en la vida social, política y judicial de los pueblos, donde son normalmente considerados como personas que poseen *conocimientos sobresalientes* en alguna ciencia o arte y son, por ello, llamados para dirimir litigios o emitir opiniones sobre aquello que conocen. Las preocupaciones de las sociedades modernas y económicamente avanzadas por la salud de los individuos y la conservación del medio ambiente frente a los peligros de las modernas y complejas tecnologías, en especial la nuclear, requieren que los conocimientos, muy especializados y singulares de los modernos expertos, puedan ser transmitidos con facilidad a la sociedad, a fin de que ésta pueda decidir sobre el desarrollo tecnológico aceptable.

Existen muchos aspectos de las tecnologías modernas, en especial los relacionados con desvíos aleatorios o accidentales de la normalidad esperada, que los expertos no pueden conocer bien, ya sea porque no se ha acumulado suficiente experiencia o porque los experimentos y simulaciones, por lo general realizados a escala reducida, no representan exactamente la realidad. Sin embargo, sus sentimientos o percepciones, aunque subjetivas, sobre tales aspectos complejos interesan igualmente, ya que analizadas con la ayuda de los principios más básicos de la teoría de las probabilidades se pueden convertir en conocimientos racionales, es decir *objetivos*, que en general se expresan en términos probabilistas. La expresión *objetivación del juicio de los expertos*, bien introducida y desarrollada por los autores, representa bien el deseo de transformar en racional lo que en parte procede de los sentimientos.

La *objetivación del juicio de expertos* (en inglés *elicitation of expert's judgement*) es una aproximación moderna -en el campo nuclear aparece por vez primera en 1990- a la solución racional de problemas complejos e inciertos. El Consejo de Seguridad Nuclear se enorgullece de haber patrocinado el desarrollo de tal metodología a través de un proyecto de investigación realizado en el

Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, dentro del contexto del IV Programa Marco de Euratom. Conocemos muy bien las altas cualidades intelectuales y el acendrado espíritu de trabajo de los autores Ricardo Bolado y Jesús Ibáñez, asociados a la Cátedra de Tecnología Nuclear del mencionado Departamento. También conocemos el espíritu innovador y la capacidad para detectar lo que es significativo que posee Alfredo Lantarón, del Consejo de Seguridad Nuclear, coautor del documento y coordinador del proyecto de investigación.

El Consejo de Seguridad Nuclear se complace además en incluir entre sus publicaciones un análisis tan moderno y significativo para sus funciones como es el *Juicio de Expertos*, que estima constituirá una fuente de inspiración para otros investigadores, y agradece también a los autores el esfuerzo que han realizado.

Profesor Agustín Alonso
Consejero del CSN

Introducción

Introducción

El presente documento tiene que ver con la *incertidumbre* y los modos de enfrentarse a ella. La incertidumbre es un rasgo esencial de nuestra vida cotidiana. Nunca sabemos con absoluta certeza qué sucesos pueden ocurrir en un futuro inmediato o simplemente qué tiempo hará mañana. Sin embargo las personas hemos aprendido a convivir con esa incertidumbre y tenemos la sensación de una existencia comfortable. Esto es debido a que se han desarrollado estrategias, tecnologías y procedimientos heurísticos de inferencia para compensar los efectos negativos de la incertidumbre, como los seguros de distinta índole o las predicciones meteorológicas diarias.

El ámbito científico y tecnológico no está libre del fenómeno de la incertidumbre. Muchas veces la solución a un problema técnico no es inmediata por diversos motivos, por ejemplo porque no se conoce el modelo teórico aplicable al mismo o porque los datos necesarios para ejecutar esos modelos no están disponibles en el momento en que se necesitan, cualquiera que sea el motivo de esa falta de disposición. Y cuando es necesario tomar decisiones importantes, por ejemplo la construcción de instalaciones que pueden suponer un riesgo para la salud pública, es normal que se disponga de varias alternativas cuyas ventajas e inconvenientes son difíciles de evaluar en su justa medida. En estos casos los *juicios u opiniones* de las personas encargadas de resolver el problema son el único medio de cubrir el vacío existente entre una información y un conocimiento limitados y la necesidad de dar solución al problema.

Los juicios pueden ser necesarios para comprender las verdaderas dimensiones del problema, para desarrollar modelos alternativos, para decidir qué datos utilizar o simplemente para interpretar los resultados. También pueden servir para definir los atributos característicos de diferentes alternativas a un problema de decisión. Debido a esto, en aquellas situaciones en que la solución de un problema técnico o la toma de una decisión sean muy importantes por cualquier circunstancia, es mejor que tales opiniones sean emitidas por *expertos*, es decir, por personas con amplios conocimientos y experiencia contrastada en el área de interés y que por lo tanto están cualificadas para responder a las cuestiones planteadas.

Puesto que el uso del *juicio de expertos* es inevitable en el ámbito científico-técnico, la cuestión fundamental que ha de considerarse es si esas opiniones deben ser ya *implícitas o informales* ya *explícitas o formales*. En cierto modo se puede decir que los juicios informales tratan de forma global el problema planteado y no consideran sus aspectos de detalle con gran profundidad. Por el contrario las opiniones formales se elaboran descomponiendo el problema de interés en pequeñas partes que posteriormente se agregan de forma lógica y coherente. Cada una de estas partes se convierte en un problema que ha de resolverse, para lo cual se pueden utilizar datos, cálculos y opiniones ade-

cuadramente justificadas. Además, por su propia naturaleza, el proceso de pensamiento explícito puede ser documentado para facilitar su posterior revisión en caso de ser necesario. Esto puede ser extremadamente importante en situaciones en que el problema que se pretende resolver sea susceptible de ser revisado por personas de organismos reguladores, de asociaciones de diverso tipo, como grupos ecologistas, e incluso del público en general.

También hay que tener en cuenta que la *psicología del conocimiento*, que es la parte de la psicología que se dedica al estudio de la percepción, los procesos de pensamiento y la elaboración de juicios, ha establecido la existencia de diversos mecanismos típicos de inferencia en condiciones de incertidumbre que cuando no se utilizan adecuadamente dan lugar a la presencia de *sesgos* en las opiniones que emiten las personas. Estos sesgos se traducen en que esas opiniones no son consistentes con la información en que se basan y no reflejan el nivel real de incertidumbre que posee la persona.

De lo anterior se deduce que las opiniones informales pueden ser útiles para resolver incertidumbres de escasa trascendencia o bien para tomar decisiones rutinarias. Pero cuando se está en presencia de incertidumbres importantes para el análisis o la toma de decisiones trascendentes es necesario acudir a opiniones formales de expertos cualificados. Los procesos estructurados y documentados con los que se obtienen estas opiniones formales se denominan *protocolos de juicio de expertos** y constan de varias fases con las que se persigue:

- Entrenar al experto en la emisión formal de opiniones.
- Identificar y minimizar los sesgos del experto.
- Definir sin ambigüedades el tema a evaluar.
- Poner a disposición del experto toda la información relevante sobre el tema.
- Comprobar la racionalidad y coherencia de las opiniones emitidas.
- Hacer una verificación final, repitiendo el proceso si es necesario.

El desarrollo de estas técnicas de objetivación del juicio de expertos ha corrido paralelo a un interés creciente en las mismas por parte de instituciones privadas y públicas deseosas de incorporar del mejor modo posible la incertidumbre en sus estudios y decisiones.

En los párrafos anteriores se han presentado las ideas básicas sobre las que tratan los siguientes capítulos de este documento. Las técnicas y procedimientos para la obtención del juicio de

* En la bibliografía anglosajona sobre juicio de expertos se utiliza el verbo *elicitate* para hacer referencia al proceso de obtención de la opinión formal de los expertos. Dada la falta de existencia de vocablo equivalente en lengua española, los autores de este documento hemos decidido utilizar la expresión genérica "protocolos de juicio de expertos" para referirnos a estos procesos estructurados de obtención de la opinión de los expertos. Esto no obsta para que en diferentes partes del texto se utilicen las palabras *elicitar* y *elicitación* y la expresión *objetivación del juicio de expertos*.

expertos que se describen son genéricos, no específicos del campo nuclear, que no obstante es una de las áreas que más ha contribuido en el esfuerzo investigador y de desarrollo en este tema.

En el capítulo I se justificará la necesidad de acudir a las opiniones de los expertos para caracterizar las incertidumbres que se presentan en las evaluaciones del riesgo asociado a las instalaciones nucleares y radiactivas. En el ámbito nuclear estas incertidumbres son muy relevantes, puesto que a menudo hay que evaluar sucesos o procesos extremadamente raros o interpretar conjuntos de datos insuficientes. También se incluye una amplia lista comentada de estudios en los cuales se han utilizado procesos estructurados de juicio de expertos tanto en el ámbito nuclear como en otros ámbitos.

El capítulo II se dedica a mostrar el marco teórico, de la teoría de la probabilidad bayesiana, en que tienen sentido los estudios de seguridad de instalaciones peligrosas y multitud de otros problemas afectados de incertidumbre. Sólo en este marco teórico pueden encontrarse justificaciones fundadas para la utilización del juicio de expertos en esos estudios. El capítulo III se dedica a estudiar los sesgos o errores sistemáticos que pueden presentar los expertos en sus evaluaciones, que pueden ser del conocimiento o motivacionales, dependiendo de su origen. Se muestran los orígenes de estos sesgos, y sus manifestaciones no deseadas. Finalmente se describen las curvas de calibrado y las reglas de puntuación habitualmente utilizadas para medir la capacidad del experto para dar estimaciones de calidad. La primera parte del cuarto capítulo se dedica a las técnicas específicas para obtener las opiniones de los expertos en términos de probabilidades y funciones de densidad o distribuciones de probabilidad, intentando eliminar, o al menos mitigar, los efectos de los sesgos. Los procedimientos estructurados más conocidos para obtener los juicios de expertos o *protocolos de juicio de expertos* son descritos en la segunda parte del cuarto capítulo. Entre ellos destaca por su carácter pionero el protocolo del Instituto de Investigación de Stanford (SRI - Stanford Research Institute) de la Universidad de Stanford, base del protocolo utilizado de modo extensivo en la realización del informe NUREG-1150 sobre la seguridad de cinco reactores nucleares estadounidenses, que a su vez ha sido base de otros protocolos utilizados por diferentes instituciones y empresas. Se describen también otros procedimientos de naturaleza distinta a los dos anteriores, como el desarrollado en el Centro Común de Investigación (JRC - Joint Research Centre), basado en la teoría de la *ingeniería del conocimiento*. El capítulo V se dedica al estudio de la combinación de las opiniones de varios expertos sobre un mismo tema. Se dedica atención a los diferentes enfoques para realizar esta tarea así como al problema de la discrepancia entre los expertos.

El sexto capítulo se dedica a describir un ejercicio de comparación de técnicas de juicio de expertos en uso en Europa auspiciado por la Unión Europea a través del JRC, así como la participación española en el mismo. En este ejercicio los grupos participantes resolvieron dos problemas del área de accidentes graves en centrales nucleares mediante sus respectivos protocolos de juicio de ex-

peritos. Como colofón, el capítulo séptimo proporciona una serie de conclusiones y recomendaciones que los autores consideran son el resultado directo del trabajo realizado. Finalmente se proporcionan una serie de apéndices en que se desarrollan algunos temas de interés en el área del juicio de expertos y que no se han incluido en el texto matriz pues romperían la cadencia del mismo.

I. Necesidad del Juicio de Expertos. Antecedentes

I. Necesidad del Juicio de Expertos. Antecedentes

Durante las últimas décadas el análisis de riesgos ha emergido como un medio útil para estructurar y tomar decisiones complejas de carácter público relacionadas con la salud y la seguridad de la población. La noción de riesgo lleva implícitas dos ideas básicas, por un lado las consecuencias adversas que pueden producirse y por otro las probabilidades con que éstas pueden suceder. Los análisis de riesgo distinguen entre la evaluación del riesgo por una parte y la gestión del riesgo por otra.

La evaluación de riesgos trata de caracterizar el riesgo potencial de aquellas situaciones que puedan representar un peligro para la salud humana o el medio ambiente. Por definición, la evaluación de riesgos lleva inherentes muchas incertidumbres pues de hecho, aunque incluye principios y bases científicas, no es una ciencia pura. Muchas de estas incertidumbres provienen de los propios estudios que soportan la predicción de riesgos. Otra fuente de incertidumbres en la evaluación de riesgos son los juicios hechos por los científicos e ingenieros que realizan la evaluación. Las diferentes hipótesis y modelos tomadas por los evaluadores pueden conducir a diferentes conclusiones. Por otra parte, en la gestión del riesgo los encargados de tomar decisiones usan esta información de las evaluaciones junto con sus propios juicios de valor para poder adoptar sus decisiones finales.

En general, se distinguen dos tipos de incertidumbres en las evaluaciones de los riesgos, las incertidumbres aleatorias y las incertidumbres del conocimiento. Las primeras son inherentes a las propias magnitudes físicas observables, y no se pueden reducir; las segundas, por el contrario, se deben al desconocimiento o falta de información y pueden reducirse.

En muchos casos en las evaluaciones se necesita información que aún no es conocida o es incompleta, y se trata de completarla mediante experimentos, que por diversos motivos no siempre son posibles. Todo ello lleva a que esta falta de información o escasez de la misma trate de suplirse mediante técnicas que recojan o capturen del modo más preciso posible el conocimiento existente. Estas técnicas se denominan de *juicio de expertos*.

Los juicios de expertos cada día son más reconocidos como fuente de datos para los análisis de riesgos. Pero como en cualquier otro campo de la técnica, la adquisición, uso y validación de los datos de los juicios de expertos deben someterse a procedimientos de manera que el proceso sea aceptable.

Estas incertidumbres asociadas al desconocimiento o escasez de datos deben tratarse adecuadamente, sólo de esta manera serán defendibles las conclusiones y por lo tanto las decisiones basadas

en estas evaluaciones. Hay que tener en cuenta que no siempre existe consenso en la forma de tratar las incertidumbres y que, por otra parte, a un análisis de incertidumbre se le exige que sea científicamente válido y aceptable. Se pretende que los procedimientos formales de los juicios de expertos ayuden a mejorar la calidad de esos análisis.

1.1. Tipos de incertidumbre

En general los tipos de incertidumbre que se pueden distinguir son diversos y sus definiciones y clasificaciones dependen en gran medida del contexto particular al que se haga referencia. En el ámbito de las evaluaciones probabilistas del riesgo es normal distinguir entre dos tipos básicos de incertidumbre: incertidumbres aleatorias e incertidumbres del conocimiento.

Las incertidumbres aleatorias afectan a magnitudes físicas observables dotadas de variabilidad inherente. Esta clase de incertidumbre aparece cuando, bajo condiciones similares, se repite varias veces un mismo experimento y cada vez el resultado obtenido es distinto. Un ejemplo de este tipo de incertidumbre es el que afecta al tiempo de fallo de un conjunto de contenedores de residuos radiactivos fabricados con igual técnica y sometidos a iguales condiciones. El tiempo de fallo seguirá una distribución determinada. Esta distribución, su forma y sus parámetros característicos podrán conocerse con mayor precisión cuanto más se experimente, probablemente mediante experimentos acelerados. Sin embargo, está claro que no se puede reducir la variabilidad de los tiempos de fallo, que es en sí la causa de la incertidumbre sobre el tiempo durante el cual cada contenedor cumplirá su cometido. De este modo se llega a la importante conclusión de que *las incertidumbres aleatorias se pueden caracterizar, pero no se pueden ni eliminar ni reducir*. Sólo si se cambia el sistema éstas pueden reducirse, por ejemplo cambiando el tipo de contenedores por otros cuyas vidas útiles presenten menor dispersión.

Las incertidumbres del conocimiento, por el contrario, están asociadas al concepto de desconocimiento o ignorancia, es decir, a la falta de información completa sobre los sistemas, fenómenos, procesos, magnitudes, hipótesis, etc. que hay que considerar en una evaluación del riesgo. Por ejemplo, una tasa de una cierta reacción química que pudiera darse en condiciones de un accidente grave en un reactor nuclear puede ser desconocida por no haberse estudiado en otros campos de la ciencia. La incertidumbre sobre la misma podría caracterizarse mediante una función de densidad de probabilidad, que en esencia estaría mensurando nuestro grado de desconocimiento sobre la misma, pues no nos es ajeno que esa tasa tendrá un único valor, que simplemente es desconocido por nosotros. Las incertidumbres del conocimiento se suelen clasificar en tres categorías:

1. *Incertidumbre en los parámetros*, que se presenta cuando no se conocen los verdaderos valores de los parámetros y magnitudes físico-químicas que se utilizan en el análisis.

2. *Incertidumbre en los modelos*, debida a la inexistencia de modelos perfectos para describir la realidad. Los modelos de los procesos físico-químicos siempre están basados en suposiciones iniciales que implican una simplificación de la realidad y por ello no son adecuados para todos los casos posibles. A menudo existen modelos alternativos para describir un mismo fenómeno y no se sabe cuál de ellos es más adecuado para llevar a cabo el análisis.
3. *Incertidumbre por falta de completitud*, que se refiere a la duda sobre si se han considerado o no todos los fenómenos, procesos, sucesos y magnitudes significativas para la evaluación del riesgo. Esta incertidumbre es de naturaleza similar a la anterior.

Las incertidumbres del conocimiento, en tanto en cuanto debidas al desconocimiento, son claramente reducibles. El verdadero valor de un parámetro no dotado de variabilidad inherente pero sí desconocido podrá, en general, llegar a ser conocido si se desarrollan las técnicas para su medición y se dispone del tiempo y dinero necesarios para realizar tal tarea. La progresiva experimentación y contraste de resultados y el desarrollo de estudios teóricos permiten obtener modelos que producen resultados más acordes con la realidad y establecer de modo más preciso su rango de aplicabilidad. Sobre el acaecimiento futuro de sucesos y escenarios puede argumentarse de modo similar, ya que lo que hoy es altamente impredecible el desarrollo de nuevas teorías y la experimentación puede tornarlo predecible, desapareciendo o aminorándose la incertidumbre por falta de completitud. Sin embargo, este proceso de reducción de las incertidumbres del conocimiento tiene un límite que viene impuesto por diversas razones, por ejemplo de tiempo, dinero o nivel de esfuerzo requerido.

1.2. Uso del Juicio de Expertos

Durante las últimas décadas se han venido usando técnicas de juicios de expertos para la resolución de problemas técnicos sobre los que era necesario tomar una decisión, si bien estas técnicas han sido muy diversas en cuanto al grado de alcance y formalismo.

En el ámbito nuclear la Comisión Reguladora Nuclear (NRC - Nuclear Regulatory Commission) de los EE UU completó en 1975 el Estudio sobre la Seguridad de los Reactores (informe WASH-1400 - Reactor Safety Study) sobre las probabilidades y consecuencias de los accidentes graves en reactores comerciales ^[1]. A pesar de ser altamente valorado por la comunidad técnica debido a su carácter pionero, este estudio recibió amplias críticas por su tratamiento inadecuado de la incertidumbre. En especial fueron motivos de duras críticas su erróneo tratamiento de los fallos en modo común y algunos usos en la caracterización, propagación e incluso interpretación de la incertidumbre. Como consecuencia de ello, cuando a finales de la década de los setenta la NRC puso en marcha un programa para elaborar una metodología con la que evaluar el riesgo asociado a los almacenamientos geológicos de residuos radiactivos de alta actividad, llevado a

cabo por los Laboratorios Nacionales de Sandia (SNL - Sandia National Laboratories), el énfasis se puso esencialmente en el desarrollo de técnicas de análisis de sensibilidad e incertidumbre ^[2].

Hacia mediados de la década pasada la NRC inició un nuevo estudio sobre la evaluación del riesgo en cinco reactores comerciales de EE UU que se ha llegado a conocer como informe NUREG-1150 ^[3]. Entre los distintos objetivos del estudio estaba proporcionar una estimación cuantitativa de la incertidumbre asociada al riesgo como respuesta a las principales críticas recibidas por el informe WASH-1400, para lo cual se hizo uso de las técnicas previamente desarrolladas por SNL. Además, para la consecución de este objetivo, se tuvo que utilizar de forma extensiva el *juicio de expertos* como único medio razonable de evaluar las incertidumbres asociadas a muchos parámetros importantes sobre los que se poseía una información limitada.

Actualmente la NRC utiliza ampliamente la evaluación probabilista del riesgo en sus distintas actividades reguladoras y de licenciamiento y el juicio de expertos se considera como un elemento esencial para la elaboración de estas evaluaciones ^[4]. El juicio de expertos se utiliza cuando los conocimientos y datos experimentales aplicables a la resolución de una determinada cuestión son insuficientes, situación que se presenta con frecuencia cuando se analizan sucesos improbables o fenómenos asociados a accidentes graves complicados. Las evaluaciones del riesgo asociado a los reactores comerciales y a los almacenamientos geológicos de residuos radiactivos de alta actividad, así como los estudios de peligrosidad sísmica son paradigmáticos a este respecto, por lo que ha sido precisamente en estos ámbitos donde el juicio de expertos se ha utilizado con mayor profusión.

El uso del juicio de expertos en el continente europeo ha sido mucho más limitado. Salvo excepciones, solamente tras la realización en EE UU del informe NUREG-1150 y la publicación de su versión definitiva a principios de la presente década comenzó a suscitarse en algunos países un auténtico interés por la aplicación de procedimientos formales de juicio de expertos para evaluar ciertos aspectos de las evaluaciones probabilistas del riesgo. Recientemente varias instituciones europeas, patrocinadas por la Comisión Europea, han aunado esfuerzos en un proyecto común denominado "Benchmark Exercise on Expert Judgement Techniques in PSA Level 2" con el fin de recopilar información sobre los usos de los procesos formales de juicio de expertos en el ámbito del Análisis Probabilista de Seguridad (APS) de centrales nucleares y para comparar las diferentes metodologías propuestas por las instituciones participantes ^[5,6]

1.3. Ventajas e inconvenientes de los procesos formales de Juicio de Expertos

Vista pues la necesidad de utilizar el juicio de expertos para caracterizar las incertidumbres del conocimiento, la cuestión que se plantea ahora es determinar si el proceso por el que se obtenga

esa información ha de ser más o menos informal o si por el contrario ha de ser un proceso formal y estructurado. Bonano y colaboradores señalan las siguientes virtudes de los procesos formales ^[7].

1. *Hacen más preciso el juicio de los expertos.* Los procesos formales están diseñados por expertos en el tema que aplican técnicas cuyo objetivo es eliminar los sesgos de diversos tipos que puedan presentar los expertos, facilitan el acceso a la información de interés y ayudan a plantear análisis sistemáticos de las tareas.
2. *Mejoran el diseño del proceso.* Actualmente existe una gran experiencia en la utilización de los procesos formales, lo que hace que cada vez estén mejor diseñados. El proceso, aún cuando sujeto a condiciones generales, se amolda al problema que se desea resolver.
3. *Hacen consistentes los procedimientos.* La consistencia se garantiza durante todo el proceso, de modo que el mismo está libre de las preferencias y deseos de los expertos.
4. *Mejoran la auditabilidad.* Un proceso formal conlleva un gran volumen de documentación acerca de los procedimientos y las evaluaciones realizadas, con el fin de que cualquiera que tenga acceso a esta documentación pueda tener una idea clara y exacta del modo en que se hizo y se dedujo todo.
5. *Mejoran la comunicación.* Entendida ésta como mejor comprensión por parte de expertos y analistas del problema tratado.
6. *Producen menores retrasos.* Un buen procedimiento evita retrasos costosos en tiempo y dinero ya que garantiza la obtención de las opiniones cuando se necesitan y la documentación correcta de lo tratado.

Ahora bien, el propio carácter estructurado de los procesos de juicio de expertos es origen de los principales inconvenientes que presentan:

1. *Necesitan un alto nivel de recursos.* El nivel de recursos requerido es mayor, desde luego, que en un proceso informal, debido esencialmente a los costes de diseño e implantación del proceso y a la alta demanda de documentación.
2. *Necesitan mayor tiempo para el proceso.* La participación de expertos ajenos a la organización interesada en realizar el estudio supone un mayor tiempo que el necesario para desarrollar un proceso informal con personal propio.
3. *Presentan menor flexibilidad.* La formalización hace que se reduzca la flexibilidad del proceso, siendo bastante difícil la implantación de cambios durante su desarrollo.

Con la vista puesta en los inconvenientes reseñados, no siempre puede estar justificado establecer procesos extremadamente formales para obtener la opinión de los expertos en todo tipo de cuestiones. Al igual que toda actividad que supone un coste o esfuerzo, los procesos formales sólo se deben utilizar cuando las ventajas sean mayores que los inconvenientes. En general no todos los te-

mas afectados de incertidumbres del conocimiento deben ser caracterizados mediante procesos formales. Por ejemplo, en el informe NUREG-1150 muchas variables de entrada identificadas inicialmente como candidatas al juicio de expertos formal se caracterizaron mediante procesos informales llevados a cabo por los propios analistas del equipo. El grupo de Bonano apunta las siguientes razones para justificar el uso de procesos formales de juicio de expertos:

1. *Necesidad de datos imposibles de obtener.* Siempre que existan datos importantes para el estudio que sólo se puedan obtener a través del juicio de expertos, o que los datos conseguibles mediante experimentación sean de escaso valor para reducir las incertidumbres, es aconsejable seguir un proceso formal.
2. *Importancia de los temas.* Siempre que un tema haya sido identificado como tema clave, la calidad de los juicios utilizados se dejará sentir. Además, dado que los temas considerados más importantes serán potencialmente los más revisados, será mejor que hayan sido resueltos de modo estructurado, con buena documentación y comunicación de información.
3. *Complejidad del tema.* Cuando la complejidad del tema tratado requiera utilizar a varios expertos será conveniente utilizar un método formalizado. Con ello se puede conseguir que todos los expertos comprendan los métodos utilizados y los empleen de modo consistente.
4. *Nivel de documentación requerido.* Siempre que el proceso general en que se inscribe la información deseada sea susceptible de ser revisado exhaustivamente es conveniente seguir un proceso formal, en el que se garantice un mayor acceso a toda la información disponible y una documentación correcta del proceso.
5. *Uso extensivo del juicio de expertos.* Cuando en un estudio va a hacerse uso extensivo del juicio de expertos lo adecuado es formalizar el proceso ya que se consigue una mayor eficacia en la recolección y proceso de la información, además del consiguiente ahorro en costes.

En el ámbito de las evaluaciones probabilistas de seguridad habrá que recurrir con frecuencia a los procesos formales de juicio de expertos, ya que en él se dan precisamente las cinco justas razones mencionadas. Más concretamente, en el caso del APS de una central nuclear la NRC prescribe dos indicadores fundamentales para el uso de los procesos formales ^[4].

1. Cuando los temas para evaluar son muy importantes para el resultado final de la evaluación o del proceso regulador.
2. Cuando los temas para evaluar requieren una aproximación multidisciplinar.

Y en el caso de las evaluaciones del comportamiento de los almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad la NRC también ha dictado recientemente sus recomendaciones basadas

en la experiencia adquirida hasta el momento. En este caso los procesos formales de juicio de expertos se deberían utilizar cuando:

1. Los datos experimentales no se pueden obtener de forma razonable o los análisis no se pueden realizar por razones prácticas.
2. Las incertidumbres son importantes y significativas con respecto al cumplimiento de la normativa.
3. Existe más de un modelo conceptual consistente con los datos experimentales.
4. Se hacen necesarios juicios técnicos para determinar si los cálculos y las condiciones de contorno son adecuadamente conservadoras.

I.4. Aplicaciones de procesos formales de Juicio de Expertos

En las siguientes páginas se va a dar una perspectiva de tres aplicaciones de procedimientos formales de juicio de expertos que resultan punto de referencia por haber constituido aplicaciones sistemáticas a problemas de gran envergadura en que la incertidumbre tenía un papel muy importante.

NUREG-1150

La metodología empleada en el NUREG-1150 se diseñó para obtener estimaciones subjetivas de magnitudes físicas de forma que representasen de la mejor forma posible las experiencias conocidas y que reflejaran de forma precisa la incertidumbre colectiva sobre esos valores. Para ello se establecieron los siguientes principios que servirían de guía para el desarrollo de los métodos:

1. Las evaluaciones debían limitarse a temas en los que no existía fuente de información alternativa, tales como datos experimentales observados o resultados de modelos de cálculo validados.
2. Los temas analizados empleando el juicio de expertos debían ser potencialmente importantes en cuanto a su impacto en el riesgo.
3. La descomposición de los temas complejos en evaluaciones más simples se hace para mejorar la calidad de la información resultante.
4. Los temas debían presentarse a los expertos sin ambigüedades y sin la posibilidad de precondicionamiento o sesgo de las respuestas.
5. Los expertos debían ser entrenados en la práctica de expresar su conocimiento en forma de distribuciones de probabilidad.
6. La discusión de los temas y opiniones alternativas debían tenerse en cuenta en reuniones controladas y estructuradas, de manera que se animase a los expertos a explorar otras alternativas.

7. La obtención del juicio de los expertos debía llevarse a cabo mediante técnicas que reflejasen el estado del arte en la evaluación de las probabilidades subjetivas.
8. La agregación de los juicios de varios expertos debía preservar la incertidumbre existente entre puntos de vista alternativos. Es decir, debe asignarse el mismo peso a la evaluación de cada uno de los expertos en su representación completa de la incertidumbre.

Es importante tener en cuenta que el estudio NUREG-1150 no trata de reducir las incertidumbres en los análisis de riesgos, ni tampoco encontrar las mejores estimaciones del riesgo (valores *best-estimate*), sino que trata de obtener un mapa no sesgado del riesgo. Se trata de descubrir el rango de incertidumbre en el riesgo inherente a las diferentes hipótesis sobre los fenómenos, condiciones de contorno y condiciones iniciales. El riesgo correspondiente a las hipótesis más plausibles (subjetivamente) tiene una probabilidad superior de ser aceptado por un experto en fenómenos de accidente severo elegido al azar. Los expertos a veces están en el error y a veces los expertos que están en lo cierto pueden encontrarse fuera de los rangos encontrados en este estudio.

Licenciamiento de almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad

En el caso del proceso de licenciamiento de un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad en EE UU, las normas dictadas por la Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA - Environmental Protection Agency) de este país sobre el almacenamiento de estos residuos en formaciones geológicas profundas sugieren el uso de análisis cuantitativos para evaluar la capacidad del emplazamiento para aislar los residuos. Según la EPA este análisis, denominado *evaluación del comportamiento*, deberá abarcar un lapso de tiempo de una decena de miles de años y en él se deberán identificar los procesos y sucesos que pueden afectar al almacenamiento y examinar sus efectos sobre el comportamiento del mismo con el fin de estimar, con sus incertidumbres asociadas, las eventuales emisiones de radionucleidos que se podrían producir ^[9].

Debido al largo período de tiempo sobre el que se deben hacer las estimaciones y a la naturaleza de los sucesos y procesos de interés es inevitable la presencia de incertidumbres del conocimiento en la evaluación ^[10]. Así, en primer lugar habrá que considerar posibles intrusiones de origen geológico y humano que pueden llevar a la ruptura de la integridad del almacenamiento. La exhaustividad en la consideración de estos hipotéticos escenarios no está garantizada, puesto que se trata de sucesos extremadamente raros sobre los cuales se tiene escaso conocimiento. De este modo, las incertidumbres por falta de completitud pueden ser especialmente relevantes. La selección y desarrollo de modelos geológicos e hidrológicos para simular el comportamiento del almacenamiento tampoco está exenta de incertidumbre, ya que en general se dispondrá de datos experimentales limitados con los que contrastar dichos modelos. Por último, los valores de muchos de los parámetros para esos modelos estarán sometidos a incertidumbre por diversos motivos, como por ejemplo la variación espacial y temporal que pueden presentar.

En un documento relativo al tratamiento de estas incertidumbres la NRC, como encargada de implantar las normas de la EPA en su proceso de licenciamiento de los emplazamientos propuestos, prescribe la experimentación de laboratorio y de campo como medio para reducir las incertidumbres del conocimiento, en particular la relativa a los parámetros ^[11]. Sin embargo reconoce que esta experimentación puede dilatarse en el tiempo y además ser costosa, aparte de que, especialmente la experimentación y toma de medidas en campo, puede perturbar el mismo medio que está pretendiendo caracterizar. Por todo ello, finalmente se recomienda limitarse a obtener la información esencial teniendo en cuenta estas restricciones. Este proceso de obtención de la información imprescindible se denomina *caracterización del emplazamiento* y puede extenderse durante algunas décadas.

Las limitaciones anteriores llevan a la NRC a considerar la evaluación del comportamiento del almacenamiento de residuos radiactivos como un proceso iterativo: durante la ejecución del plan de caracterización del emplazamiento se evalúa periódicamente su comportamiento previsto, con lo que se puede determinar la utilidad de la información disponible e identificar las áreas afectadas de mayor incertidumbre y que por lo tanto requieren un mayor esfuerzo experimentador. No obstante la NRC reconoce explícitamente que llegará un punto en que, a pesar de todos los esfuerzos razonables realizados, quedarán unas *incertidumbres residuales* difícilmente reducibles, que tendrán que ser tratadas necesariamente mediante el juicio de expertos. Se indica que habrá que hacer uso de los procesos formales de juicio de expertos para identificar y caracterizar las incertidumbres que sean cuantificables y para determinar el efecto sobre la evaluación del comportamiento de las incertidumbres no cuantificables.

En relación con lo anterior, Bonano y colaboradores han identificado las tareas más importantes que se podrían beneficiar del uso de los procesos formales de juicio de expertos en las evaluaciones del comportamiento de los almacenamientos geológicos de residuos radiactivos de alta actividad ^[7].

1. Desarrollo de escenarios, que supone la identificación y criba de sucesos y procesos, la formulación y criba de escenarios y la asignación de probabilidades de ocurrencia a los mismos.
2. Desarrollo de modelos, que supone la selección e interpretación de datos, la elaboración de modelos conceptuales y el desarrollo de códigos de cálculo.
3. Estimación de la incertidumbre en los parámetros.
4. Selección de la información importante para la evaluación de seguridad.
5. Toma de decisiones sobre el diseño, construcción y operación del almacenamiento.

Los análisis de la peligrosidad sísmica

Los temas en los que se han empleado juicio de expertos son muy diversos, y se han aplicado a sectores muy diferentes. Un ejemplo es el proceso empleado en la evaluación probabilista de la

peligrosidad sísmica. En el procedimiento empleado se identifican y describen diferentes papeles de los expertos, incluyendo al experto como proponente de una posición técnica específica, como evaluador de varias posiciones en la comunidad técnica, y como integrador técnico.

En este estudio ^[12] se identifican cuatro tipos de consenso y se establece una jerarquía de complejidad para los temas técnicos, consistente en cuatro niveles, que representan un nivel creciente de participación de los expertos en el desarrollo de los resultados; en el nivel más complejo (nivel 4) se constituye formalmente un panel de expertos y se obtiene la información de las interpretaciones del panel a partir de la información técnica más relevante sobre los temas. En el estudio se define un elemento llamado “Facilitador/Integrador Técnico” (TFI - Technical Facilitator/Integrator). El procedimiento del estudio se centra en cómo deben ser implantadas y estructuradas las funciones de los TFI en casos más complejo, o los “Integradores Técnicos” (TI - Technical Integrators) en casos menos complicados. Los TI y los TFI pueden ser una persona o en el caso más complejo, los TFI, un grupo pequeño.

El papel de los TI y TFI es la integración técnica, el TFI tiene además la función de facilitador cuando un tema es considerado demasiado complejo y las opiniones de los paneles de expertos tienen que ser elicitadas. El estudio identifica varios problemas que surgieron en trabajos anteriores de evaluación de la peligrosidad sísmica, los cuales se resuelven explícitamente a través de los TFI y de la metodología asociada.

1.5. Observaciones sobre el uso e interpretación del Juicio de Expertos

Como se ha visto en las evaluaciones probabilistas de seguridad será necesario hacer un amplio uso del juicio de expertos. Ahora bien, se ha de tener cuidado de que el mismo no sea indiscriminado. No ha de perderse en el olvido la premisa principal para recurrir a la opinión de los expertos: *estar en presencia de incertidumbres del conocimiento irreducibles o prácticamente irreducibles*. Si ésta no se da no está justificada la utilización del juicio de expertos. Esta idea ha sido expresada muy claramente por la NRC en los siguientes términos:

“El uso formal del juicio de expertos en evaluaciones del comportamiento es un complemento, no un sustituto, para otras fuentes de información técnica y científica, como la recolección de datos y la experimentación” (pág. E-11) ^[11].

Por lo tanto, no se debe aceptar bajo ningún concepto sustituir datos disponibles o que pueden obtenerse razonablemente, ni análisis técnicos y científicos rigurosos y universalmente reconocidos, por juicio de expertos. El único modo de asegurar un uso racional y adecuado del juicio de

expertos en aquellos procesos donde se prevea una utilización amplia de los mismos es mediante el establecimiento de una *garantía de calidad* que planifique, implante, revise y documente su uso ^[13].

Una segunda dificultad asociada a la representación y uso del juicio de expertos es el posible exceso de confianza en la opinión de los expertos. En la mayor parte de los casos esas opiniones van acompañadas de incertidumbres muy significativas y es fundamental que las mismas se reflejen en la representación formal de las opiniones y su uso posterior. Por ejemplo la documentación o difusión de un simple valor medio sin incluir un rango o distribución de probabilidad para una cantidad de interés puede provocar la ilusión de una mayor precisión y objetividad, lo que puede llevar a evitar eventuales esfuerzos adicionales para obtener nueva y mejor información sobre esa magnitud. Por lo tanto, se debe tener presente que el juicio de expertos debiera servir para caracterizar la incertidumbre, nunca reducirla, proporcionando así una imagen del estado de conocimiento sobre el tema de interés. De nuevo la NRC se expresa a este respecto del siguiente modo:

“El juicio de expertos no debe considerarse equivalente a cálculos técnicos basados en leyes científicas universalmente aceptadas ni a la disponibilidad de gran cantidad de datos sobre las magnitudes de interés. El juicio de expertos es quizá más útil cuando se hace explícito en problemas en que no se dispone de datos, pues en esos casos se expresa lo que los expertos saben y lo que no saben” (pág. E-11) ^[11].

Otra característica importante del juicio de expertos que ha de tenerse en cuenta es que el estado de conocimiento de un experto sobre una cuestión de interés siempre se refiere a un instante de tiempo particular, y que conforme están disponibles nuevos datos experimentales, cálculos o conocimientos teóricos sobre esa cuestión, la opinión del experto debería modificarse para tenerlos en cuenta, disminuyendo o aumentando su incertidumbre según los casos. Además, cada experto puede tener acceso a distinta información o puede interpretar la disponible de forma diferente, por lo que no existe ninguna razón lógica por la cual todos los expertos deban tener el mismo estado de conocimiento sobre una misma cuestión. En definitiva, la presencia de discrepancias entre distintas opiniones no se debe interpretar como un defecto a evitar de cara al uso posterior de esas opiniones, sino como una consecuencia natural de la incertidumbre a la que está sometida la cuestión que se evalúa.

1.6. Ejemplos de aplicaciones de Juicio de Expertos

Desde comienzos de la década de los ochenta se han realizado bastantes análisis relativos a la selección de emplazamientos para almacenamientos de residuos radiactivos y a las evaluaciones de comportamiento de los mismos. En muchos de esos casos se ha recurrido a los procesos formales de juicio de expertos para evaluar cuestiones de distinta naturaleza.

En los estudios relativos al emplazamiento de Hanford, en el estado de Washington (EE UU), el juicio de expertos formal se utilizó para evaluar funciones de utilidad y distribuciones de probabilidad para diversos parámetros ^[14,15]. Las funciones de utilidad sirvieron para aplicar análisis de decisión multiatributo para clasificar las distintas opciones de construcción identificadas como viables. Posteriormente, para estimar los flujos de agua subterránea y de gas metano en la instalación propuesta se evaluaron distribuciones de probabilidad de 41 parámetros geológicos, hidrológicos y de disolución de gases.

Un análisis de decisión multiatributo también fue utilizado por el Departamento de Energía (DOE - Department of Energy) de los EE UU en 1986 para clasificar cinco potenciales emplazamientos de un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad ^[16]. Se utilizaron seis grupos de expertos de diversas áreas de conocimiento para evaluar tanto juicios de valor sobre las actitudes de la población hacia el riesgo como aspectos técnicos relativos al comportamiento previsto del almacenamiento. Tanto los procedimientos utilizados para obtener las opiniones de los expertos como las propias opiniones fueron sometidas posteriormente a una revisión pública ^[17]. Otra aplicación del análisis de decisión que merece ser mencionada se refiere a la comparación de diversos modos de emplazamiento vertical y horizontal de bidones de combustible nuclear quemado en un almacenamiento en formaciones de sal ^[18]. En este caso los expertos proporcionaron sus opiniones sobre algunos de los diez atributos que se identificaron como importantes.

SNL ha venido aplicando de modo sistemático juicio de expertos a diferentes facetas de la evaluación iterativa de la seguridad de la Planta Piloto de Aislamiento de Residuos Radiactivos (WIPP - Waste Isolation Pilot Plant) en el estado de Nuevo Méjico (EE UU) ^[7,8,19,20,21,22]. La evaluación de distribuciones para parámetros inciertos es una de las áreas a que se han dedicado esfuerzos, especialmente en el caso de parámetros relacionados con la solubilidad y sorción de radionucleidos ^[23] importantes desde el punto de vista de la seguridad. SNL ha aplicado también juicio de expertos, en este caso tanto de modo formal como informal, a la interpretación de datos ^[28], con vistas a su utilización en los modelos usados en la evaluación del comportamiento.

El desarrollo de escenarios ha ocupado también un lugar destacado en las aplicaciones de juicio de expertos para este almacenamiento ^[24,25]. En estos estudios se ha puesto de manifiesto la importancia que tiene la opinión de los expertos para la realización creíble de esta tarea, sobre todo en lo que se refiere a la criba de sucesos y procesos y a su combinación para la generación de escenarios. Después de la selección de todos los procesos y sucesos relevantes, las cribas de los mismos suelen realizarse tomando como criterios los posibles daños a que podrían llegar a dar lugar así como la verosimilitud con que se puedan producir. Una vez eliminados procesos y sucesos que por su poca verosimilitud o pequeñas consecuencias, evaluadas ambas mediante juicio de expertos, se combinan los restantes para generar los escenarios verosímiles, que de nuevo serán

cribados atendiendo a los mismos tipos de criterios, produciendo finalmente el conjunto de escenarios que realmente pueden inducir riesgo apreciable en la instalación.

Capítulo aparte merece el caso especial de los escenarios de intrusión humana, a los que se ha dedicado especial atención y han sido merecedores de un profundo estudio mediante juicio de expertos ^[26,27,53]. En concreto se trató, por una parte, de inferir posibles situaciones futuras que pudieran conducir a intrusiones en el almacenamiento, por otra, de estudiar el tipo de señales que habría que dejar en las inmediaciones del repositorio para advertir a generaciones futuras de la existencia de *algo* inductor de riesgo.

Procesos de juicio de expertos estructurados han sido utilizados por diferentes instituciones americanas que han participado en proyectos relacionados con el almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad de Yucca Mountain, como Rockwell International ^[50] (RI), SNL ^[51,94] y el Instituto de Investigación del Sudoeste ^[52] (SRI - Southwest Research Institute). En el proyecto para el aislamiento de residuos radiactivos en basalto (BWIP - Basalt Waste Isolation Plant) se utilizó juicio de expertos para caracterizar la incertidumbre en la porosidad del medio y el cociente de anisotropía de la conductividad hidráulica ^[50]. Posteriormente, SNL realizó sendas Evaluaciones del Comportamiento del Sistema Completo para el mismo almacenamiento de residuos radiactivos de Yucca Mountain en 1991 ^[51] y 1993 ^[94]. En el primero de estos estudios se hizo uso de juicio de expertos para obtener información sobre parámetros hidrológicos como coeficientes de sorción para diferentes medios geológicos y tasas de percolación. En el segundo de los estudios se utilizó para caracterizar los coeficientes de sorción y las solubilidades para varios radionucleidos. El Instituto de Investigación del Sudoeste utilizó técnicas de juicio de expertos ^[52] para estimar condiciones climáticas de contorno para el mismo emplazamiento en diferentes tiempos futuros (siempre inferiores a los diez mil años).

Ya en Europa, el Departamento de Medio Ambiente (DOE - Department of Environment) del Reino Unido participó junto a otras instituciones europeas en el proyecto comunitario PACOMA ^[29,30], apostando claramente por los procedimientos de juicio de expertos para abordar el problema de la caracterización de incertidumbres en parámetros de entrada, aplicándolo al caso del emplazamiento de Harwell. Esta aproximación al problema fue posteriormente utilizada por el Organismo de Su Majestad para el control de la Polución (HMIP - Her Majesty's Inspectorate of Pollution) del DOE en los estudios Dry Run 3 ^[31,32,33,34], para la evaluación de la seguridad del mismo emplazamiento. Mientras que en el caso de PACOMA se centró el estudio en parámetros geosféricos, como dispersividades, difusividades y conductividades hidráulicas entre otros; en el estudio Dry Run 3 se volcaron más las tintas en parámetros relacionados con cambios ambientales y biosféricos en general, por ejemplo características de los suelos, como porosidades, coeficientes de sorción de los suelos o conductividades térmicas de los mismos, tanto congelados (*permafrost*) como no congelados.

Las distintas áreas de conocimiento implicadas en el APS de las centrales nucleares también han recurrido desde principios de la década pasada a los procesos formales de juicio de expertos como medio de caracterizar incertidumbres. La fiabilidad humana es un ejemplo de ello, puesto que las propuestas e intentos para realizar grandes bases de datos a partir de las incidencias registradas durante la operación normal de las plantas se han encontrado con dificultades debidas a las peculiaridades de los distintos reactores, a la falta de una clasificación clara y comúnmente aceptada de los errores humanos y, en último término, a la falta de experiencia sobre el comportamiento humano en situaciones de accidente grave. Así, la obtención de datos experimentales sobre tasas de errores humanos es un proceso lento en el que además existen dificultades de interpretación, lo cual constituye una razón suficiente para acudir a la opinión de los expertos ^[35].

La utilización del juicio de expertos en la cuantificación de la fiabilidad de sistemas y componentes tiene una justificación similar. Puesto que las centrales nucleares se han mostrado históricamente fiables, en general no existe abundancia de datos experimentales sobre la fiabilidad de sistemas y componentes en estas instalaciones, de modo que no es posible basar las estimaciones de las tasas de fallo exclusivamente sobre esa experiencia. Por ello es necesario acudir a los datos existentes relativos a otros tipos de instalaciones o industrias que hagan uso de tecnologías similares, por ejemplo centrales térmicas convencionales, plantas con procesos industriales de diversa índole, la industria aeroespacial, etc. En estos casos la opinión de los expertos sirve para transformar dichos datos de forma apropiada y establecer sus límites de aplicación en el sector nuclear. Un ejemplo de esto es la guía del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sobre datos de fiabilidad de equipos mecánicos, eléctricos y electrónicos para su uso en el ámbito nuclear, en la cual se utilizaron más de 200 expertos en el tema para la tarea de interpretación mencionada ^[36].

El análisis de la degradación del núcleo de un reactor nuclear durante un accidente grave y la predicción de las consecuencias sobre la contención implica el modelado de muchos parámetros y procesos físicos de naturaleza muy compleja. Debido a ello y al hecho de que los códigos de que se dispone actualmente no proporcionan respuestas totalmente fiables, el nivel 2 del APS depende en gran medida de la opinión de los expertos sobre los parámetros relevantes en tales procesos y la verosimilitud de los distintos resultados. Un ejemplo de la aplicación del juicio de expertos al estudio de la fenomenología de los accidentes graves es el informe realizado por el Grupo de Revisores de las Explosiones de Vapor (Steam Explosion Review Group) de la NRC sobre el daño a la contención por explosiones de vapor ^[37]. También el cálculo del término fuente está prescrito por la NRC y la Organización Internacional para la Energía Atómica (IAEA-OIEA - International Atomic Energy Agency) como un área en donde la opinión de los expertos es especialmente relevante para evaluar la incertidumbre asociada a los resultados de tipo determinista que pueden proporcionar diversos códigos ^[38].

En los últimos años el nivel 3 del APS ha recibido considerable atención después de la aparición a finales de la década pasada de varios códigos para la estimación probabilista de las consecuencias radiológicas de un eventual escape radiactivo. Los modelos utilizados por estos códigos para la simulación del transporte y deposición del material radiactivo, su entrada en la cadena alimenticia, el cálculo de dosis y la evaluación del coste económico de las medidas de protección incluyen un buen número de parámetros sobre cuyos valores en muchas ocasiones se posee muy poca información o bien dependen de juicios de valor, por lo que la incertidumbre asociada a sus resultados es muy importante. En 1991 la Comisión de las Comunidades Europeas y la NRC comenzaron a considerar la posibilidad de realizar conjuntamente un análisis de incertidumbres sobre los resultados de los códigos MACCS y COSYMA en el cual al juicio de expertos se le reservaba un importante papel en la evaluación de distribuciones de probabilidad para los parámetros inciertos ^[39,40,41]. El proyecto comenzó en 1992, finalizando las publicaciones sobre el mismo en 1997. En este estudio de gran alcance, se establecieron grupos de expertos para evaluar temas relacionados con la dispersión atmosférica y la deposición del material radiactivo, su transferencia a través de la cadena alimenticia, la dosimetría externa e interna y el riesgo de daños inmediatos y diferidos a la salud de la población.

La evaluación de la peligrosidad sísmica de los emplazamientos nucleares es otro tema que está sometido a gran incertidumbre, puesto que no se comprenden totalmente los mecanismos que causan los sismos ni los modos de propagación de los mismos. Por ello, los modelos que se han propuesto para su predicción son poco fiables y la información existente es interpretada de forma diferente por los diferentes expertos. A principios de la década pasada, la NRC, reconociendo este hecho, promovió un amplio estudio sobre el riesgo sísmico de 69 emplazamientos de reactores nucleares situados en la zona este de los EE UU llevado a cabo por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL - Lawrence Livermore National Laboratory). En este estudio los expertos tuvieron que interpretar datos geológicos, geofísicos y sismológicos ^[42,43,44]. Posteriormente la NRC recomendó que la industria nuclear realizase su propio estudio con el fin de alcanzar una posición común respecto a la peligrosidad sísmica. En este caso el Instituto de Investigación para la Energía Eléctrica (EPRI - Electric Power Research Institute) desarrolló procedimientos alternativos para la obtención de la opinión de los expertos que se aplicaron al estudio de 56 de los 69 emplazamientos anteriores ^[45]. A pesar de que en ambos estudios se utilizaron fuentes de información comunes, se generaron sin embargo resultados bastante diferentes, lo cual se atribuyó en la revisión posterior y entre otras causas, a las diferencias entre los modos de obtener la información de los expertos en ambos estudios ^[46].

La experiencia anterior ha sido recogida recientemente en una guía metodológica dedicada a la realización de evaluaciones probabilistas de peligrosidad sísmica que ha sido patrocinada por NRC, DOE y EPRI, y ha sido realizada por un comité designado para tal fin (Senior Seismic Hazard

Analysis Committee), que ha investigado con especial énfasis la utilización de procesos formales de juicio de expertos para caracterizar las incertidumbres del conocimiento. Los resultados de este proyecto se publicaron en 1995 y actualmente están en proceso de revisión ^[12].

Como es bien sabido el informe NUREG-1150 está dedicado al estudio probabilista de seguridad de cinco reactores comerciales norteamericanos de agua ligera, las unidades 1 de Surry, Zion, Sequoyah y Grand Gulf, y la unidad 2 de Peach Bottom ^[3]. En la realización de este informe se consideraron las incertidumbres asociadas a diversos parámetros y modelos de los niveles 1 y 2 a través de la incertidumbre en las variables de entrada de los modelos lógicos utilizados para evaluar el riesgo. Con el fin de obtener distribuciones de probabilidad para dichas variables se crearon siete grupos de expertos que trataron temas relacionados con el análisis de las frecuencias accidentales, la progresión del accidente y el término fuente. Las distribuciones de probabilidad de las variables que se identificaron como muy importantes para el riesgo se obtuvieron de los expertos utilizando un procedimiento formalizado diseñado con el fin de minimizar los sesgos y maximizar la precisión y auditabilidad de los resultados, mientras que para el resto de variables afectadas de incertidumbre pero menos importantes se recurrió a analistas de proyecto o investigadores de diversos laboratorios nacionales para que diesen estimaciones más informales. El comité que revisó posteriormente los resultados del informe identificó diversos pros y contras del proceso formal de juicio de expertos utilizado ^[47].

Las técnicas de juicio de expertos han venido utilizándose en otros campos diferentes del nuclear prácticamente desde hace casi medio siglo. Un ejemplo de esto es la utilización que se ha dado en multitud de estudios al método Delphi ^[48] (debe su nombre al oráculo del dios Apolo en Delfos, Delphi en lengua inglesa). Este método para obtener información valiosa de expertos fue desarrollado por la Rand Corporation a principios de los años cincuenta, pero su utilización generalizada se retrasó unos diez años por haber sido desarrollado para el ejército de los Estados Unidos y haberse mantenido en secreto durante ese tiempo. Algunas de las primeras aplicaciones de este método se realizaron para estimar la envergadura de un posible ataque nuclear de la Unión Soviética con el fin de aniquilar la industria militar americana. Continuando en la línea de su diseño original para realizar planificación estratégica, fue aplicado tanto por el gobierno como por muchas empresas de los Estados Unidos para predecir posibles cambios tecnológicos. En el área de la ingeniería civil se utilizó para estudiar los problemas de gestión de recursos a corto y largo plazo en la región de los grandes lagos americanos. En este estudio, dada la complejidad y diversidad de los problemas tratados, como las fuentes originarias de contaminación, los métodos de tratamiento de aguas residuales o las estrategias de planificación regional, se contó con tres grupos de expertos, uno de ingenieros y científicos, otro de ecologistas y un último grupo de decisores (políticos y hombres de negocios).

El acta para el aire limpio requiere a la EPA que establezca y revise periódicamente la normativa nacional sobre la calidad del aire. Hasta finales de los años setenta esta tarea la realizaba la

EPA con su propio personal mediante una revisión de la bibliografía sobre temas atmosféricos y biológicos más relevante. Sin embargo, viendo los inconvenientes de realizar estas tareas sin contar con expertos en sentido estricto sobre esos temas, la EPA comenzó a requerir la colaboración de dos grupos de investigación, uno del SRI, y otro de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA - University of California at Los Angeles). La EPA, con la colaboración de estos dos grupos ^[49], aplicó de modo experimental técnicas de juicio de expertos en la revisión de la normativa del dióxido de carbono que realizó a principios de los ochenta. Cuando a mediados de los 80 tocó el turno a la revisión de la normativa sobre el plomo en el aire, la EPA consideró ya suficientemente maduras las técnicas de juicio de expertos para aplicarlas de modo sistemático tanto a la evaluación de incertidumbres científicas y técnicas como al propio proceso de toma de decisión que es en sí la elaboración de la norma. Se estudió mediante estas técnicas, por ejemplo, la disminución de hemoglobina en sangre debido a la exposición a atmósferas con plomo. Este trabajo recibió el visto bueno del Comité Científico de Asesoramiento a la EPA para el aire limpio.

La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos realizó en los años 1976, 1979 y 1982 sucesivos estudios sobre el agotamiento, debido a la acción de gases cloro-flúor-carbonados (CFC), de la capa de ozono existente en la estratosfera ^[49]. Estos compuestos gaseosos, especialmente el F-11 y el F-12, descomponen el ozono, provocando una mayor transparencia de dicha capa a la dañina radiación ultravioleta procedente del sol. La incertidumbre en este problema abarca desde el incompleto conocimiento de los procesos más importante de transporte y reacciones químicas, en este último caso cuáles son y el valor de sus tasas, hasta los efectos biológicos de la radiación, especialmente en la génesis de cánceres cutáneos. En estos estudios se usó juicio de expertos para caracterizar incertidumbres.

En ocasiones se han utilizado también procesos de juicio de expertos para revisar aplicaciones de juicios de expertos llevadas a cabo en el pasado. En la referencia 95 se estudian los errores cometidos en la predicción de la potencial salvación de vidas humanas como consecuencia del uso del *air bag*. En 1984 el gobierno americano estimó que se tenían suficientes datos experimentales y juicios de expertos como para predecir que se salvarían de 4500 a 9000 vidas humanas anualmente si fueran instalados *air bag* en las partes delanteras de los vehículos. Las estimaciones oficiales actuales basadas en una amplia experiencia dicen que las vidas que se salvan anualmente son aproximadamente 3000. Esta predicción fue demasiado optimista y precisa. Los errores más importantes se debieron a las estimaciones optimistas sobre la eficacia de los *air bag* en situaciones en las que los individuos no llevan cinturón de seguridad y demasiado pesimistas en las situaciones en las que se lleva puesto el cinturón de seguridad. En este ejemplo no se tuvieron en cuenta muchas variables y las opiniones que dieron los expertos destacan por su gran precisión. La sobreconfianza y los sesgos en las opiniones de los expertos fueron las dos razones más importantes de las estimaciones llevadas a cabo en 1984.



II. Un marco teórico para el Juicio de Expertos

II. Un marco teórico para el Juicio de Expertos

A pesar de que en las últimas décadas han surgido teorías para abordar el problema general de la incertidumbre ^[54] tales como la teoría de los *conjuntos borrosos* de Zadeh, de las *funciones de creencia* de Shafer, de las *probabilidades superior e inferior* de Dempster y de los *factores de certidumbre* de Shortliffe, ninguna de ellas ha sido suficientemente desarrollada y por lo tanto adoptada definitivamente por los científicos y técnicos que trabajan día a día en temas de incertidumbres. Tanto es así que a fecha de hoy es la teoría de las probabilidades el lenguaje comúnmente aceptado para hablar de incertidumbres; es a través de la probabilidad como se mide la incertidumbre, y prácticamente todo el mundo científico y técnico ha tenido mayor o menor contacto con esta teoría y sabe hacer uso de ella, al menos operacionalmente, para resolver problemas en su trabajo cotidiano.

Sin embargo, existen algunos problemas, en concreto a la hora de interpretar de modo preciso el significado de la probabilidad, qué significa, y a qué se puede atribuir una probabilidad. Esto tiene gran importancia de cara a ver cómo se pueden medir los dos tipos de incertidumbre caracterizadas: las del conocimiento y las aleatorias.

II.1 Los axiomas de Kolmogorov

Toda teoría matemática se asienta sobre un sistema o conjunto de axiomas. Un sistema de axiomas no es sino la definición de una serie de relaciones entre entes matemáticos. La aplicación de las reglas de la lógica sobre esos entes y sus relaciones permiten deducir otras propiedades. No tiene por qué haber conexión entre todo ello y el mundo real. Sin embargo, el proceder común de la ciencia suele ser partir de una parte del mundo real y tratar de darle una estructura matemática que explique su comportamiento.

La teoría de la probabilidad puede considerarse como la teoría de las funciones aditivas y no negativas definidas sobre conjuntos, cuya axiomatización, encuadrada en la teoría de la medida, se debe a Kolmogorov ^[55]. En esta axiomatización no se define el concepto de probabilidad ni se conecta formalmente la misma con el mundo real; la probabilidad pertenece en este caso a lo que Lacombe llama *dominio intuitivo de base* de la teoría.

Sea U el espacio muestral de un experimento particular, es decir, el conjunto de todos los resultados posibles del experimento. Cada subconjunto $A \subset U$ se denomina *suceso*. Una probabilidad P se define como una función real que asigna un número $P(A)$ a cada suceso y que satisface las siguientes propiedades (*axiomas de Kolmogorov*):

- 1) Para cada suceso A se cumple que $0 \leq P(A) \leq 1$.
- 2) $P(U) = 1$.
- 3) Siendo $\{A_i\}_{i \in I}$ un conjunto finito o infinito numerable de conjuntos disjuntos dos a dos, se cumple que $P(\cup_{i \in I} A_i) = \sum_{i \in I} P(A_i)$ (I es un conjunto de índices que recorre toda la partición).

Obsérvese que estos tres axiomas indican cuál es el modo en que han de combinarse las probabilidades de sucesos relativamente sencillos para producir las de sucesos más complicados. Sin embargo no dicen nada acerca de cómo deben ser construidas las probabilidades iniciales. Del intento de conectar estos axiomas con el mundo real surgen los tres modos principales de interpretar la probabilidad: el clásico, el frecuentista y el bayesiano.

II.2. La interpretación clásica de la probabilidad

La interpretación clásica de la teoría de las probabilidades se debe esencialmente a De Moivre y Laplace ^[56]. Estos consideraban que dado un experimento aleatorio que pudiera dar lugar a n resultados mutuamente excluyentes e igualmente posibles, y si n_A de esos resultados posibles presentasen un atributo A , entonces la probabilidad de este suceso sería

$$P(A) = \frac{n_A}{n}, \quad (1)$$

Por ejemplo considérese la probabilidad de que al lanzar un dado salga un 2. Si el dado no presenta ningún defecto se puede deducir de su simetría que cualquier resultado es igualmente probable. Entonces, si A es el suceso "al lanzar el dado sale un 2", su probabilidad es $P(A) = 1/6$, ya que $n=6$ y $n_A=1$.

Puede demostrarse que esta interpretación cumple los axiomas de Kolmogorov; sin embargo presenta inconvenientes fundamentales, ya que es inservible cuando el número posible de resultados del experimento es infinito o en aquellos casos en que el concepto de equiposibilidad no sea aplicable (por ejemplo en el lanzamiento de un dado lastrado). Por esto mismo resulta inútil para caracterizar las incertidumbres del conocimiento, ya que en general en estas situaciones no hay ningún concepto apriorístico de simetría o equiposibilidad.

II.3. La interpretación frecuentista de la probabilidad

En esta interpretación, entre cuyos más firmes defensores e impulsores se encuentra von Mises ^[57], la probabilidad tiene el significado de un límite de frecuencias. Dado un experimento

aleatorio repetible muchas veces en condiciones similares, uno de cuyos posibles resultados es el suceso de interés A , se define $P(A)$ como

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n}, \quad (2)$$

donde n es el número de veces que se realiza el experimento y m el número de veces que aparece el suceso de interés. Se supone por principio que este límite existe. Se puede demostrar fácilmente que las probabilidades interpretadas en estos términos cumplen los axiomas de Kolmogorov.

De lo anterior se deduce que al amparo de este enfoque sólo tiene sentido hablar de probabilidades cuando se puede considerar un experimento que pueda repetirse muchas veces en condiciones similares, aunque esto sólo sea conceptualmente; no tiene sentido hablar de ellas refiriéndose a sucesos únicos en su tipo. *Por tanto, este tipo de probabilidades sirve para medir incertidumbres aleatorias, pero no las del conocimiento.*

Ha de tenerse en cuenta que el límite dado en la expresión (2), con el que se define la probabilidad desde el punto de vista frecuentista, no puede considerarse como un límite de los tratados en el análisis matemático, ya que no se puede demostrar que dado un $\varepsilon > 0$ exista un n' , tal que para todo $n > n'$ se cumpla $|m/n - P(A)| < \varepsilon$. Sólo puede afirmarse que es extremadamente improbable que la diferencia en valor absoluto entre ambos valores supere la cantidad ε , y esto es tanto más improbable cuanto mayor sea n , con lo cual se está utilizando el término definido en la definición.

Además de no poder abarcar el caso de incertidumbres del conocimiento, se le achaca a este enfoque la imposibilidad práctica de calcular probabilidades en algunos casos, ya que:

- Al no ser posible una experimentación indefinida, la información disponible respecto a la frecuencia relativa es siempre limitada.
- El sistema observado puede variar con el tiempo, y con él las frecuencias relativas.

Para evitar los inconvenientes de este enfoque frecuentista, fundamentalmente en lo que se refiere a sucesos únicos en su tipo, y poder asignar a éstos probabilidades, surge la interpretación bayesiana que se comenta a continuación.

II.4. La interpretación bayesiana de la probabilidad

Los métodos bayesianos tienen su origen en un trabajo del reverendo Thomas Bayes publicado póstumamente en 1763 ^[58]. Modernamente la resurrección de la inferencia bayesiana mediante la definición de la probabilidad como una medida de la verosimilitud de la ocurrencia de sucesos o proposiciones se debe a Ramsey ^[59], Savage ^[60, 61], Lindley ^[62] y De Finetti ^[63, 64]. Puede afirmarse que la interpretación bayesiana de la probabilidad y todo el desarrollo estadístico dimanado de esta nueva interpretación se asienta sobre tres ideas fundamentales, a saber: *Los grados de convicción* (degrees of belief), la *coherencia* y la *intercambiabilidad* (exchangeability)*.

Grados de convicción

La interpretación bayesiana amplía significativamente las aplicaciones de la teoría de probabilidades mediante la incorporación del concepto de *proposición*. Una proposición no es más que una afirmación acerca de la ocurrencia o no de ciertos sucesos; por ejemplo es una proposición la frase "todos los cuerpos son atraídos por la Tierra". Las proposiciones y los sucesos se tratan de forma homogénea. Así, por ejemplo, al igual que se dice que un suceso ocurre o no ocurre, se puede decir que una proposición es cierta o falsa, o al referirse a que dos sucesos son mutuamente excluyentes, en el caso de proposiciones se diría que no pueden ser ciertas simultáneamente. *La probabilidad de un suceso o proposición se define como una medida del grado de creencia en la ocurrencia del suceso o la certeza de la proposición*. Por ejemplo sea A una proposición y H el conjunto de conocimientos de una persona. Entonces $P(A/H)$ representa la probabilidad asignada por la persona a la proposición A , es decir, el grado de convicción de esa persona en que A es cierta dados sus conocimientos: Si la persona cree que A es cierto, entonces $P(A/H) = 1$, y si cree que A es falso, entonces $P(A/H) = 0$. Otros puntos en el intervalo $(0, 1)$ expresan grados intermedios de creencia entre la veracidad y la falsedad de la proposición A .

No se debe pasar por alto el hecho de que en la interpretación bayesiana tan importante es el suceso o proposición que se evalúa como la información sobre la que se basa dicha evaluación. Si dos personas asignan probabilidades diferentes a un mismo suceso es porque la evidencia sobre la que se basan es diferente, es decir, una persona está evaluando $P(A/H)$ y otra $P(A/H')$. Según Lindley ^[62], si esas dos personas pusieran en común sus conocimientos a través de un proceso de discusión y contrastación de informaciones ambas asignarían al suceso la misma probabilidad: $P(A/H, H')$. No obstante esto es más que discutible y permanece como una cuestión abierta de la teoría. De hecho, bayesianos convencidos como Savage ^[60] admiten sin duda la posibilidad de que dos personas que ten-

* Estrictamente, la teoría de la probabilidad bayesiana se encuadra dentro de un marco más amplio que es la *teoría de la decisión*, para abordar la cual sería menester introducir también el concepto de *utilidad*. Sin embargo, los autores de este documento hemos preferido restringir este trabajo al marco de la probabilidad, imprescindible para el procedimiento consistente de información en ámbitos de incertidumbre y paso previo a la toma de decisiones.

gan acceso a los mismos datos sobre un tema asignen probabilidades diferentes. Debe tenerse en cuenta que la cuantificación de las opiniones normalmente introduce mucha controversia, lo cual, sin embargo, no es una deficiencia de la teoría bayesiana, sino una dificultad inherente al propio tema.

La interpretación más intuitiva de la probabilidad, al menos en opinión de los autores de este documento, es aquella dada en términos de apuestas, que se debe a Ramsey ^[59]. Este autor considera que si una persona da un valor p a $P(A/H)$ significa que, si se invitase a esa persona a hacer una apuesta de modo que ganase una cantidad S en caso de que A fuese cierta y no ganase nada en caso de que A fuese falsa, pS sería la máxima cantidad que llegaría a pagar por tener derecho a intervenir en tal juego.

Coherencia

Como se deduce de lo anterior, desde el punto de vista bayesiano no existe una probabilidad "verdadera" para un suceso o proposición, cada cual puede asignar a los sucesos aquellas probabilidades que reflejen sus conocimientos o creencias acerca del mundo real. Esta naturaleza subjetiva de la probabilidad y su correspondiente carácter no unívoco llevó a Bruno de Finetti a afirmar en el prefacio a su libro *Theory of Probability* ^[64] que *la probabilidad no existe*, frase justamente famosa porque resume de forma admirable el parecer de los estadísticos bayesianos. Sin embargo esta libertad no es una licencia para la arbitrariedad a la hora de asignar probabilidades. El requisito que exige la teoría cuando se evalúa una distribución de probabilidad es que la misma sea *coherente*, lo cual quiere decir que los grados de convicción deben cumplir los axiomas de Kolmogorov y poseer la *propiedad transitiva*. La coherencia es la objetividad normativa que se le debe exigir a todo evaluador.

Una persona no es coherente cuando sus preferencias no cumplen la propiedad transitiva ^[65]. Considérese la existencia de tres alternativas posibles a_1 , a_2 y a_3 entre las que se puede escoger, y la relación $a_1 < a_2$ que indica que la alternativa a_2 es estrictamente preferida a la alternativa a_1 . Una persona coherente establecería un cierto orden de preferencias, como por ejemplo $a_1 < a_2 < a_3$. Sin embargo, si el orden de preferencias establecido fuera $a_1 < a_2$, $a_2 < a_3$ y $a_3 < a_1$ entonces sería incoherente. Con este último orden de preferencias la relación $a_1 < a_2$ indica que si la persona se viese obligada a aceptar la opción a_1 y se le diese la oportunidad de cambiar a la opción a_2 , previo pago de una cierta cantidad, sería capaz de pagar hasta una cierta cantidad, digamos x , por cambiar de opción. En esta coyuntura, si se le diese de nuevo la oportunidad de cambiar previo pago, sería capaz de pagar hasta otra cierta cantidad, digamos y , por eludir la opción a_2 y poder aceptar la opción a_3 . Finalmente, si se le diese otra vez la oportunidad de cambiar, por estar en la obligación de aceptar a_3 y tener orden de preferencia $a_3 < a_1$, sería capaz de llegar a pagar hasta otra cierta cantidad z por cambiar de nuevo de opción, con lo cual la persona habría sido capaz

de pagar hasta una cantidad $x + y + z$ por estar de nuevo en la situación original. En palabras de Smith ^[65]: *"Si se aspira a evitar expresar preferencias cuyas implicaciones sean tales que conduzcan a una pérdida cierta de algo que se valora, entonces ha de garantizarse que estas preferencias cumplan la propiedad transitiva"*. El concepto de incoherencia pasado a probabilidades, interpretadas como apuestas, conduce a establecer un conjunto de probabilidades, también en términos de apuestas, que lleva a una pérdida segura (*Dutch Book*).

La coherencia en la persona a la hora de evaluar probabilidades no está garantizada, aunque pueda parecer extraño. Para comprobarlo basta el siguiente ejemplo ^[67]. Supóngase una urna con 90 bolas, de las cuales 30 son rojas y el resto azules y verdes. Se pide a una persona que escoja entre el color rojo y el verde y extraiga una bola al azar, de modo que reciba un premio si el color elegido y el de la bola extraída coinciden. Los experimentos realizados muestran que la gente tiende a elegir mayoritariamente el color rojo, probablemente por tener la certidumbre de ganar el premio con probabilidad $1/3$. Sean los sucesos R , A y V respectivamente "extraer bola roja", "extraer bola azul" y "extraer bola verde". Obsérvese que la decisión anterior implica asumir las relaciones $P(R) > P(A)$ y $P(R) > P(V)$ entre los tres sucesos. Dependiendo de cuál sea la creencia respecto a la probabilidad de obtener bola roja y azul se tendrá alguna de las siguientes relaciones globales de preferencia: $P(R) > P(V) > P(A)$ o $P(R) > P(A) > P(V)$. Si se les plantea posteriormente la posibilidad de elegir dos colores en vez de uno, es decir, elegir o bien los colores rojo y azul o bien verde y azul, recibiendo nuevamente un premio si el color de la bola extraída y alguno de los dos elegidos coinciden, la gente mayoritariamente elige el par verde y azul, de nuevo por la certidumbre de ganar el premio con probabilidad $2/3$. Pues bien, esta elección viola la propiedad transitiva, puesto que al ser igual en ambos pares de colores la probabilidad de obtener bola azul, la elección del par verde y azul en vez del par rojo y azul implica que $P(V) > P(R)$, lo cual está en clara contradicción con las creencias iniciales.

En este ejemplo se comprueba que una simple falta de atención puede conducir a creencias incoherentes. Pero, como se describirá en el capítulo III, existen numerosos mecanismos, algunos de ellos muy sutiles, que afectan al modo en que las personas procesan la información y sacan conclusiones a partir de ella y que pueden hacer que las mismas sean erróneas. Por lo tanto, *no basta con que las creencias de una persona sean coherentes, sino que además deben reflejar adecuadamente los conocimientos y evidencias que están a su disposición*. Como ha establecido De Finetti ^[68]: *"El verdadero problema de la probabilidad subjetiva ... se refiere a las investigaciones sobre los modos en que la gente mas o menos educada evalúa sus probabilidades. Según mi opinión, este es el campo en el cual es necesaria la cooperación entre todos los especialistas implicados, y en particular la de los psicólogos"* (p. 33). Los métodos que pueden ayudar en la evaluación de las probabilidades subjetivas se describirán en el capítulo IV.

Intercambiabilidad

Bruno de Finetti ^[66] introdujo el nuevo concepto de intercambiabilidad en 1931. La motivación de introducir en primer lugar el concepto de sucesos intercambiables para ampliarlo después a cantidades aleatorias intercambiables vino motivado por la convicción en la imposibilidad de aprender de la experiencia basada en la observación de sucesos o valores aleatorios independientes. Sea x_1, x_2, \dots, x_n una serie de cantidades -variables- aleatorias que siguen una ley conjunta de probabilidades $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$, que representa los grados de convicción de un individuo sobre ellas. Esta ley lleva implícita otras relaciones como que la distribución marginal de un subconjunto de ellas para cualquier m que cumpla $1 \leq m < n$ es :

$$p(x_1, \dots, x_m) = \int p(x_1, \dots, x_n) \cdot dx_{m+1} \cdot \dots \cdot dx_n . \quad (3)$$

Además, la distribución de las x_{m+1}, \dots, x_n aún no observadas condicionada por las cantidades ya observadas $x_1 = x_1, \dots, x_m = x_m$ es:

$$p(x_{m+1}, \dots, x_n / x_1, \dots, x_m) = p(x_1, \dots, x_n) / p(x_1, \dots, x_m). \quad (4)$$

Está claro que si las cantidades x_i son todas independientes entre sí, se cumplirá que

$$p(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i) , \quad (5)$$

por lo que

$$p(x_{m+1}, \dots, x_n / x_1, \dots, x_m) = p(x_{m+1}, \dots, x_n), \quad (6)$$

de lo que se deduce que no hay ningún aprendizaje de la experiencia cuando se trata con cantidades aleatorias independientes, como ya se avanzó al principio del párrafo. La idea tras la que van los estadísticos bayesianos es que si se pretende aprender algo de la experiencia, en las distribuciones predictivas - $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - debería haber algo que permitiese tener mayor información sobre los posibles sucesos que se den en el futuro a medida que se dispone de más datos, es decir, debería haber algún tipo de dependencia entre las cantidades estudiadas implícita en la propia ley de probabilidades $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Dado que el concepto de independencia es excesivamente fuerte, De Finetti ^[64] trató de encontrar algún otro concepto que relajase las condiciones de independencia lo suficiente como para poder aprender de la experiencia. Este concepto es el de *intercambiabilidad*. Se dice que un

conjunto de cantidades aleatorias son *finitamente intercambiables* en las condiciones de una ley $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ de probabilidades cuando se cumple que

$$p(x_1, \dots, x_n) = p(x_{\pi(1)}, \dots, x_{\pi(n)}), \quad (7)$$

donde $\pi(1), \dots, \pi(n)$ es cualquier permutación aleatoria del conjunto de los números naturales del 1 al n . Una secuencia infinita de cantidades aleatorias se dice *infinitamente intercambiables* si cualquier subconjunto finito de esa secuencia es finitamente intercambiable, o lo que es lo mismo, la distribución conjunta de cualquier subconjunto finito de esa secuencia no depende de qué cantidades se incluyan en el subconjunto si no sólo de cuantas se incluyen en el mismo. Resumiendo, cantidades aleatorias intercambiables son aquellas que ocurren en una secuencia aleatoria siendo irrelevante, desde el punto de vista de su probabilidad conjunta, el orden en que aparecen.

Considérese el caso del lanzamiento de una moneda y considérese la secuencia de cantidades o variables aleatorias x_1, x_2, \dots , definidas del modo $x_i=1$ si el i -ésimo lanzamiento tiene por resultado cara y $x_i=0$ en caso contrario. Llámese $p(x_i)$ a la distribución de probabilidad de x_i y llámese $p(x_{j_1}, \dots, x_{j_n})$ y $p(x_{k_1}, \dots, x_{k_n})$ a las probabilidades de dos secuencias cualesquiera de n lanzamientos de moneda, es decir, $\{j_1, \dots, j_n\}$ y $\{k_1, \dots, k_n\}$ son dos subconjuntos cualesquiera de n elementos del conjunto de los números naturales. Entonces se cumple que $p(x_{j_1}, \dots, x_{j_n}) = p(x_{k_1}, \dots, x_{k_n})$, por lo que los resultados del lanzamiento de una moneda son sucesos o cantidades intercambiables. Obsérvese que esto se traduce en que la probabilidad de que cualquier secuencia de n lanzamientos (no necesariamente consecutivos) tiene igual probabilidad que cualquier otra secuencia de n lanzamientos que haya resultado en igual número de caras, y por tanto de cruces. Así, $p(x_1=1, x_2=1, x_3=0) = p(x_3=1, x_5=0, x_9=1)$, lo cual es efectivamente cierto; cualquier observador dirá que si se lanza repetidas veces la misma moneda, la probabilidad de que salga cara las dos primeras tiradas y cruz la tercera es igual a la probabilidad de sacar cara en las tiradas tercera y novena y cruz en la quinta.

En 1937 De Finetti demostró el siguiente teorema :

Teorema (de representación para variables aleatorias que toman valores aleatorios 0 y 1). Si x_1, x_2, \dots es una secuencia infinitamente intercambiable de variables aleatorias que toman valores 0 y 1 con distribución de probabilidades $P(x)$, entonces existe una distribución de probabilidad $Q(\theta)$ tal que la densidad conjunta $p(x_1, \dots, x_n)$ adopta la forma :

$$p(x_1, \dots, x_n) = \int_0^1 \prod_{i=1}^n \theta^{x_i} \cdot (1-\theta)^{1-x_i} \cdot dQ(\theta),$$

donde $Q(\theta) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(y_n / n \leq \theta)$, siendo $y_n = x_1 + \dots + x_n$ y $\theta = \lim_{n \rightarrow \infty} (y_n / n)$.

Este teorema desde el punto de vista bayesiano es fundamental, y sin él la interpretación bayesiana de las probabilidades probablemente nunca habría llegado a tener la difusión y grado de aplicación que ha alcanzado. Obsérvese que es como si:

- 1) las x_i fueran consideradas variables aleatorias de Bernouilli independientes, condicionadas por una variable aleatoria θ . De hecho el producto dentro de la integral se corresponde con la función de verosimilitud clásica para una muestra aleatoria de una variable aleatoria de Bernouilli.
- 2) θ tuviera asignada una función de distribución Q , y
- 3) en virtud de la ley fuerte de los grandes números, $\theta = \lim_{n \rightarrow \infty} (y_n / n)$, de modo que puede interpretarse como las creencias sobre el límite de la frecuencia relativa de aparición de unos en la secuencia aleatoria.

Es importante darse cuenta de que la aparición de la distribución $Q(\theta)$, a la que en adelante se aludirá como distribución a priori del parámetro θ o prior a secas, no es una imposición de la teoría si no resultado del teorema.

Con posterioridad, se demostró el teorema de representación para una secuencia infinitamente intercambiable de cualquier variable aleatoria, en que se proporciona la distribución conjunta predictiva de las variables aleatorias x_1, \dots, x_n como:

$$p(x_1, \dots, x_n) = \int_{\Theta} \prod_{i=1}^n p(x_i / \theta) \cdot dQ(\theta), \quad (8)$$

donde Θ es el conjunto de todos los posibles valores que puede tomar el parámetro θ . Aparece en la fórmula el producto de la función de verosimilitud de la muestra por la función de distribución *a priori* del parámetro. Conviene mencionar ahora que el producto de 1 hasta n - función de verosimilitud - no es si no la probabilidad de la muestra condicionada por el valor del parámetro - $p(x_1, \dots, x_n / \theta)$ - es decir, dentro de la integral que permite obtener la distribución predictiva conjunta, se está suponiendo que las observaciones son *condicionalmente independientes e idénticamente distribuidas, siendo el valor de θ el suceso condicionante*. Puede demostrarse que variables aleatorias intercambiables y variables aleatorias condicionalmente independientes e idénticamente distribuidas son el mismo concepto.

Repárese en el hecho de que los parámetros que intervienen en los modelos probabilistas, como el parámetro θ que en todo momento se está utilizando en esta argumentación, y que bien podría ser, por ejemplo, la vida media de unos motores cuyo tiempo de vida sigue una ley exponencial, son considerados variables aleatorias, con su función de distribución $Q(\theta)$, como cualquier observable con comportamiento aleatorio. Se verá a lo largo de todo el documento que esto

es así, y que efectivamente, en el campo bayesiano cualquier parámetro será tratado como una variable aleatoria, pero teniendo en mente que no será observable (salvo en casos degenerados). Es conveniente recordar también que en el caso clásico esto no es así, en el caso clásico los parámetros de los modelos probabilistas son tratados como constantes cuyos valores son desconocidos.

11.4.1. La fórmula de Bayes

A partir del teorema general de representación se llega de modo directo a conocer la forma de la distribución predictiva de una subsecuencia de variables intercambiables (x_{m+1}, \dots, x_n) condicionada por los valores de otra subsecuencia (x_1, \dots, x_m) , simplemente aplicando la definición de la probabilidad condicionada:

$$\begin{aligned} p(x_{m+1}, \dots, x_n / x_1, \dots, x_m) &= \frac{p(x_1, \dots, x_n)}{p(x_1, \dots, x_m)} = \frac{\int_{\Theta} \prod_{i=1}^n p(x_i / \theta) \cdot dQ(\theta)}{\int_{\Theta} \prod_{i=1}^m p(x_i / \theta) \cdot dQ(\theta)} = \\ &= \int_{\Theta} \prod_{i=m+1}^n p(x_i / \theta) \cdot \frac{\prod_{i=1}^m p(x_i / \theta)}{\int_{\Theta} \prod_{i=1}^m p(x_i / \theta) \cdot dQ(\theta)} \cdot dQ(\theta) = \\ &= \int_{\Theta} \prod_{i=m+1}^n p(x_i / \theta) \cdot dQ(\theta / x_1, \dots, x_m), \end{aligned} \quad (9)$$

donde se aprecia que tiene la misma estructura que las predictivas no condicionadas, existiendo dentro de la integral la función de verosimilitud de las $n-m$ últimas observaciones multiplicada por una nueva función de distribución, que no es si no una nueva prior condicionada por las m primeras observaciones :

$$q(\theta / x_1, \dots, x_m) = \frac{q(\theta) \cdot \prod_{i=1}^m p(x_i / \theta)}{\int_{\Theta} \prod_{i=1}^m p(x_i / \theta) \cdot dQ(\theta)}, \quad (10)$$

donde ya se ha pasado de la función de distribución a la función de densidad de θ . Esta última expresión es el teorema de Bayes, que muestra la forma de la *distribución a posteriori del parámetro* θ , al que líneas arriba se aludió como nueva prior condicionada, en función del modelo paramétrico para las variables consideradas - $p(x_1, \dots, x_m / \theta) = p(x_1 / \theta) \cdot \dots \cdot p(x_m / \theta)$ - y de la prior para θ . El término *a posteriori* se refiere al hecho de que es a posteriori de recibir la información contenida en una muestra. La fórmula (10) es la fórmula que el analista debe usar en el ámbito bayesiano para modificar de modo consistente con la teoría de probabilidades sus grados de convicción originales sobre un parámetro - prior - sirviéndose de la información proporcionada por una muestra. El efecto real que tiene la verosimilitud sobre la prior es producir un repesado de ésta. La verosimilitud, una vez se dispone ya de la muestra, es una función del parámetro θ que

tanto mayor valor tomará cuanto más verosímil sea que ese valor del parámetro haya podido engendrar esa muestra en las condiciones de los infinitos modelos posibles considerados $p(x / \theta)$ (esos infinitos modelos aludidos podrían ser, por ejemplo, las infinitas distribuciones exponenciales consideradas al variar la vida media θ de *cero* hasta *infinito*). La verosimilitud tendrá un máximo que corresponderá al valor de θ que haga más verosímil esa muestra, según nos alejemos de él la verosimilitud decrecerá. El punto en que la prior será multiplicada por el valor más grande posible será precisamente ese. Al alejarse de él el valor por el que será multiplicada la prior será cada vez menor. De este modo, a la luz de la muestra, el analista habrá aumentado tanto más su confianza en que el parámetro pueda tomar valores en una región cuanto más próxima esté esa región al máximo de la verosimilitud.

Obsérvese que la expresión integrada en todo el dominio de definición del parámetro - Θ - da como resultado 1.0, lo cual indica que efectivamente $q(\theta / x_1, \dots, x_m)$ es una función de densidad de una variable aleatoria. El denominador representa la probabilidad de la muestra admitiendo que θ efectivamente es una variable aleatoria, de hecho no es más que la aplicación del teorema de la probabilidad total a la hora de expresar dicha probabilidad. Dado que esta integral es un cierto valor, llamémoslo c , que realmente sólo actúa como factor de normalización, es muy habitual encontrar la fórmula de Bayes simplificada del modo

$$q(\theta / x_1, \dots, x_m) \propto q(\theta) \cdot \prod_{i=1}^m p(x_i / \theta), \quad (11)$$

la cual indica que la distribución a posteriori es proporcional al producto de la verosimilitud y la prior.

La verosimilitud, cuando se cuenta con una muestra grande, algunas de cuyas observaciones pueden diferenciarse mucho unas de otras, puede llegar a tomar valores muy pequeños en todo su rango de definición en comparación con los de la prior, de modo que si se representasen conjuntamente en una gráfica la verosimilitud probablemente no se diferenciase del valor cero, por ello, en ocasiones se define la *verosimilitud normalizada* del modo

$$\frac{\prod_{i=1}^m p(x_i / \theta)}{\int_{\Theta} \prod_{i=1}^m p(x_i / \theta) \cdot d\theta}, \quad (12)$$

con lo que ya integra a 1 y permite que se pueda comparar rápidamente su posición relativa respecto a la prior.

yesiano actualiza su distribución subjetiva sobre el parámetro según va adquiriendo nueva información, sin información sobre ninguna tirada basará su opinión sobre cualquier lanzamiento en su prior, sin embargo utilizará toda la información disponible una vez la tenga para reevaluar sus probabilidades sobre un lanzamiento futuro determinado.

11.4.2. La actualización bayesiana de la información

A partir de toda la discusión anterior parece que se deben aceptar dos tipos de probabilidades, la subjetiva para sucesos únicos o proposiciones y la frecuentista para sucesos repetitivos, ya que no se puede discutir la evidencia empírica de que la frecuencia relativa de un suceso tiende a estabilizarse cuando se repite muchas veces el experimento aleatorio. Esta dualidad, sin embargo, no es necesaria porque, como se establecerá a continuación, si existe información acerca de la frecuencia relativa de un suceso, el requisito de coherencia forzará a los subjetivistas a asignar valores numéricos a la probabilidad de ese suceso que son muy próximos al valor de la frecuencia relativa. Así, *la aproximación frecuentista a la probabilidad es consistente con el método subjetivista cuando se tiene un gran número de datos experimentales.*

La interpretación bayesiana de las probabilidades convierte a la *fórmula de Bayes* en una potente herramienta de actualización de los grados de convicción sobre una proposición o suceso cuando se adquieren nuevas evidencias. Sea H el conjunto de conocimientos de una persona y $\{z_i\}_{i \in I}$ una partición del espacio muestral de sucesos. Entonces la probabilidad bayesiana que esa persona atribuye al suceso z_k es $P(z_k / H)$. La adquisición de una evidencia H' hace que esa probabilidad varíe según indica la fórmula de Bayes:

$$P(z_k / H, H') = \frac{P(H' / H, z_k) \cdot P(z_k / H)}{P(H' / H)}, \quad (14)$$

donde $P(z_k / H, H')$ es la probabilidad de z_k *a posteriori*, $P(z_k / H)$ es la probabilidad de z_k *a priori* y $P(H' / H, z_k)$ es la *verosimilitud de la evidencia* dados el conocimiento H y la ocurrencia del suceso z_k . $P(H' / H)$ es la probabilidad de la evidencia a la luz de los conocimientos anteriores y se puede considerar como un factor de normalización, ya que la suma extendida a toda la partición de las expresiones de tipo (14) debe ser 1, o lo que es lo mismo, la suma de las probabilidades *a posteriori* de todos los elementos de la partición del espacio muestral ha de ser 1. El valor de esta probabilidad es:

$$P(H' / H) = \sum_i P(H' / H, z_i) \cdot P(z_i / H), \quad (15)$$

en virtud del teorema de la probabilidad total y por lo recién dicho se puede ignorar en los cálculos intermedios. Por lo tanto la ecuación (14) se puede escribir como:

$$P(z_k / H, H') \propto P(H' / H, z_k) \cdot P(z_k / H), \quad (16)$$

lo que significa que *la probabilidad a posteriori es proporcional a la probabilidad a priori y a la verosimilitud de la evidencia*.

A partir de la ecuación (16) se pueden obtener dos resultados importantes. Si la probabilidad a priori de un suceso es nula entonces la probabilidad a posteriori de ese suceso también será nula a pesar de lo fuerte que sea la evidencia en contra. Por lo tanto ha de tenerse extremado cuidado en no asignar probabilidades nulas *a priori* a los sucesos a no ser que, por supuesto, se pueda concluir definitivamente que los mismos son imposibles. En la bibliografía anglosajona se alude a la necesidad de tener cuidado en estas situaciones rememorando a Sir Oliver Cromwell dirigiéndose al parlamento para que éste no tomase decisiones de consecuencias irreversibles sin previa meditación profunda*. El segundo resultado se refiere a la existencia de una fuerte evidencia, en cuyo caso la verosimilitud dominará la opinión *a posteriori* y la opinión *a priori* será irrelevante. Este resultado se utilizará para establecer la conexión entre la probabilidad subjetiva y la frecuencia relativa.

Supóngase que se realiza un experimento consistente en lanzar n veces una moneda que se sospecha que puede no estar equilibrada. Antes de iniciar el experimento no se tiene ninguna información que ayude a evaluar la probabilidad p de aparición de cara, por lo que, *a priori*, se elige para este parámetro una distribución no informativa $\pi_0(p)$ (por ejemplo la distribución uniforme entre 0 y 1). El resultado del experimento resulta ser r caras y $n - r$ cruces, lo cual supone una evidencia experimental que se debe considerar para actualizar $\pi_0(p)$. Aplicando la fórmula de Bayes se tiene:

$$\pi_1(p) \propto p^r (1-p)^{n-r} \cdot \pi_0(p), \quad (17)$$

donde la verosimilitud de la evidencia se obtiene a partir de la fórmula clásica para el proceso de Bernoulli. Cuando n es grande (fuerte evidencia), la verosimilitud es prácticamente nula en todo punto excepto en las proximidades de $p = r/n$, donde la función alcanza el máximo. Por ejemplo, si $n = 30$ y $r = 5$ y se representa $\pi_0(p)$ por una distribución beta definida en el intervalo $[0,1]$ con parámetros $\alpha = \beta = 1$ (idéntica a una distribución uniforme entre 0 y 1), la fórmula de Bayes queda de la forma:

$$\pi_1(p) = \frac{p^5 (1-p)^{25} \cdot \frac{\Gamma(2)}{\Gamma(1) \cdot \Gamma(1)} p^{1-1} (1-p)^{1-1}}{\int_0^1 p^5 (1-p)^{25} \cdot \frac{\Gamma(2)}{\Gamma(1) \cdot \Gamma(1)} p^{1-1} (1-p)^{1-1} \cdot dp}, \quad (18)$$

* *Gentlemen, I beseech ye, think ye, in the bowels of Christ, that ye may be wrong.* Sir Oliver Cromwell dirigiéndose al parlamento en torno a 1651.

que es una nueva distribución beta definida en el intervalo $[0,1]$ con función de densidad

$$\pi_1(p) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} p^{\alpha-1} (1-p)^{\beta-1} = \frac{\Gamma(32)}{\Gamma(6) \cdot \Gamma(26)} p^5 (1-p)^{25}, \quad (19)$$

es decir, proporcional a la verosimilitud. En la figura 2.1, en donde están representadas las dos funciones de densidad $\pi_0(p)$ y $\pi_1(p)$ para este ejemplo, se aprecia que cuando la distribución a priori es no informativa la posterior está determinada exclusivamente por los datos: Las probabilidades significativas se producen en torno al valor $p = 5/30$, que es aproximadamente 0,17, obtenido por experimentación. Así, se puede establecer la ligazón entre la probabilidad subjetiva y la frecuencia relativa en los siguientes términos: *Una persona coherente cuyo cuerpo de conocimiento incluye la observación de una frecuencia a largo plazo asignará una probabilidad subjetiva al suceso en cuestión que será próxima al valor de la frecuencia observada.*

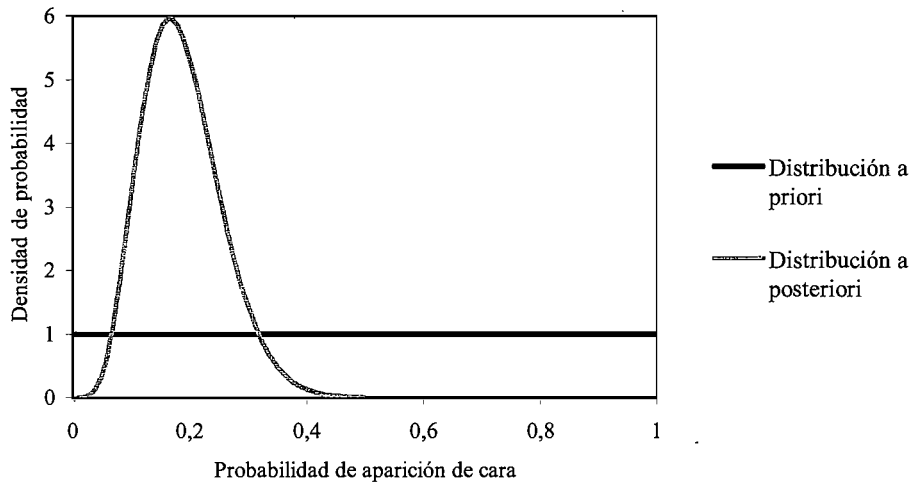


Figura 2.1. Distribuciones a priori y a posteriori para el ejemplo de la moneda

Una aplicación importante que se da a la fórmula de Bayes, aplicada al caso continuo, es la estimación de los parámetros de una función de distribución. Supóngase que se quiere estudiar una variable aleatoria X que se sabe sigue una ley, $f(X/\theta)$, determinada por un parámetro θ desconocido que se desea conocer. Para hacer la estimación en el caso bayesiano se parte de considerar el parámetro desconocido, θ , como una variable aleatoria en sí, a la cual se asigna, *a priori*, una distribución $\pi(\theta/H)$ que indica en torno a qué valor se cree que puede estar θ y con qué incertidumbre se conoce esa ubicación. Para mejorar el conocimiento sobre θ se toma una muestra - evidencia - $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, la cual tendrá una verosimilitud $P(\vec{X}/\theta, H) = \prod_{i=1}^n f(X_i/\theta)$. La aplicación de la fórmula de Bayes proporciona la distribución a posteriori que ha de asignarse a θ :

$$\pi(\theta/\vec{X}, H) \propto P(\vec{X}/\theta, H) \cdot \pi(\theta/H), \quad (20)$$

que es una nueva función de densidad de probabilidad. Si se quiere tener un valor puntual como estimación se pueden seguir varios criterios: Tomar la moda, la media, o la mediana. Además podría asignársele un intervalo de confianza.

Para ver el sentido de la estimación bayesiana de modo más claro considérese que se dispone de una variable aleatoria X de la que se sabe que sigue una ley normal de media desconocida, θ , y de varianza conocida, σ^2 . Supóngase que, por los conocimientos de que se dispone, se intuye que θ pueda tomar un valor en torno a μ_0 , considerando que tan posible es equivocarse hacia arriba como hacia abajo, y que tanto más difícil se considera que θ pueda tomar un valor cuanto más se aleje de μ_0 . En estas condiciones es razonable asignar una distribución *a priori* a θ normal de media μ_0 y varianza σ_0^2 , varianza que razonablemente mide nuestra incertidumbre sobre θ ; es decir $\pi(\theta / H) \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$. Para mejorar el conocimiento sobre θ se toma una muestra de tamaño n que tendrá verosimilitud:

$$P(\bar{X} / \theta, H) = (2\pi\sigma^2)^{-n/2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \theta}{\sigma} \right)^2} \quad (21)$$

Introduciendo esto en la expresión (20) y después de unos simples cálculos se obtiene

$$\pi(\theta / \bar{X}, H) \sim N(\mu_n, \sigma_n^2), \quad (22)$$

donde los parámetros μ_n y σ_n^2 valen

$$\mu_n = \frac{\frac{n\bar{X}_n}{\sigma^2} + \frac{\mu_0}{\sigma_0^2}}{\frac{n}{\sigma^2} + \frac{1}{\sigma_0^2}} \quad \text{y} \quad \sigma_n^{-2} = n\sigma^{-2} + \sigma_0^{-2} \quad (23)$$

Este resultado se interpreta del siguiente modo: *a priori* se considera θ con posibles valores en torno a μ_0 , mientras que después de recibir la información se consideran como posibles valores aquellos en torno a μ_n . Además, tanto más tenderá μ_n a la media muestral, \bar{X}_n , cuanto mayor sea el tamaño muestral (conforme aumente n más valor se da a la muestra, permaneciendo la opinión *a priori* con igual peso). σ_n^{-2} es la *precisión* de la estimación, que es la suma de las precisiones de la muestra, n / σ^2 , y de la distribución *a priori*, σ_0^{-2} . Cuanto mayor sea el conocimiento *a priori* y el tamaño muestral con mayor precisión (menor incertidumbre) se conocerá θ *a posteriori*. La figura 2.2 representa la verosimilitud normalizada y las densidades de probabilidad *a priori* y *a posteriori* del modelo de estimación recién descrito para los siguientes datos: $\sigma^2 = 2$, $\mu_0 = 14$, $\sigma_0^2 = 2$ y $\bar{X} = (-3, 15, 23, 8, 13, 17)$. Tal y como se ha indicado, la media de la distribución *a posteriori*, $\mu_n = 12,43$, se encuentra entre la media de la distribución *a priori*, $\mu_0 = 14$, y la de la

verosimilitud, $\bar{X}_n = 12,17$. Obsérvese que para un tamaño muestral pequeño como es $n = 6$ la opinión *a posteriori* se aproxima mucho a la media experimental, que tiende a dominar la estimación.

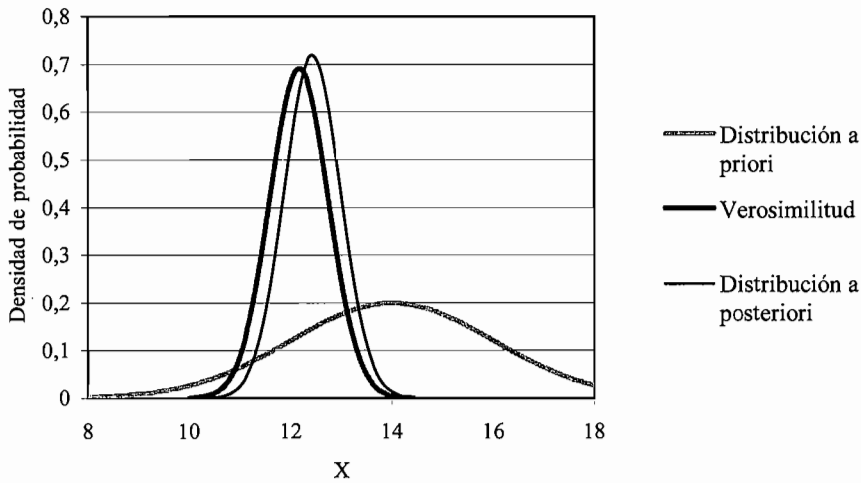


Figura 2.2. Distribuciones a priori, a posteriori y verosimilitud normalizada para el ejemplo de estimación en un modelo gaussiano.

La validez de este proceder en la inferencia viene avalada por su consistencia con el modo en que el ser humano aprende de la experiencia, y por converger con el método de máxima verosimilitud al aumentar el tamaño muestral, independientemente de la elección de la función de densidad *a priori*, con la salvedad, ya comentada antes, de que se le asigne valor nulo.

Resumiendo todo lo dicho en este apartado, han de quedar tres ideas claras respecto a la aproximación bayesiana. La primera es que en esta aproximación tiene cabida establecer probabilidades sobre la veracidad de proposiciones, con lo cual queda resuelto el problema de los sucesos únicos en su tipo; las incertidumbres del conocimiento son mensurables en términos de grados de convicción. La segunda es que estos grados de convicción son individuales, no existe como tal "la probabilidad de un suceso", sino "la probabilidad que una persona asigna a un suceso"; sin embargo, estos grados de convicción no son libres, sino que han de ser coherentes y estar basados en la evidencia cuando ésta exista. La tercera es la insustituible utilización de la fórmula de Bayes, tanto en su forma discreta como en su forma continua, para incorporar el nuevo conocimiento adquirido de la experiencia. En el apéndice A se hace uso extensivo de la actualización bayesiana de la información cuando ésta es proporcionada por expertos.

III. Los sesgos en los juicios y la evaluación de los expertos

III. Los sesgos en los juicios y la evaluación de los expertos

El ser humano en su vida cotidiana se enfrenta a situaciones en que debe hacer juicios sobre determinados parámetros o sucesos. Un juicio es un proceso cognitivo inferencial mediante el cual se obtienen conclusiones acerca de cualidades o cantidades desconocidas basándose en la información disponible. Según la investigación acerca de estos procesos cognitivos la formación de un juicio se desarrolla en tres fases ^[69]:

1. Asignación de una importancia relativa a cada fuente de información.
2. Desarrollo de una relación funcional específica entre cada fuente de información y el juicio final.
3. Utilización de un método particular para integrar todas las dimensiones del problema.

Asimismo la investigación experimental en psicología del conocimiento ha producido dos conclusiones firmes: *el ser humano posee una capacidad limitada para procesar información y tiene una marcada tendencia a percibir e interpretar el mundo de un modo esencialmente causal*. La limitación del hombre como sistema procesador de información se debe a cuatro dificultades básicas ^[70]:

1. Su percepción de la información no es completa sino *selectiva*, adquiriendo sólo una fracción de aquella a la que tiene acceso.
2. No puede procesar la información en paralelo, sino que debe hacerlo *secuencialmente* en el tiempo.
3. No tiene capacidad de realizar cálculos que se podrían llamar “óptimos”, haciendo uso en su lugar de *estrategias simplificadoras* para procesar la información.
4. Presenta una *capacidad de memoria limitada*.

Por otra parte su tendencia a interpretar el mundo causalmente hace que se comporte como un *mal estadístico intuitivo*, no pudiendo en ocasiones identificar y aceptar como tales situaciones de aleatoriedad y tener en cuenta resultados básicos de probabilidad y estadística.

Se ha comprobado extensamente que estas limitaciones inducen sesgos en cualquiera de las tres etapas de que consta la formación de un juicio, con la consiguiente falta de precisión y objetividad en el mismo, por lo que resulta necesario identificar esos mecanismos espurios de razonamiento para diseñar técnicas para la elaboración de juicios que sean compatibles con las habilidades naturales del hombre y que a su vez intenten minimizar la influencia de sus deficiencias.

Los sesgos mencionados han dado en llamarse *sesgos cognitivos o del conocimiento*. Además de estos existen otros, llamados *sesgos motivacionales*, relacionados con posibles posturas de interés

(económico, laboral, etc.) frente al posible resultado de la evaluación, que también habrá que eliminar, llegando incluso a prescindir de un experto cuando sus sesgos motivacionales sean muy marcados.

Como se dijo en el capítulo anterior bajo la interpretación subjetivista de la probabilidad, marco en el cual tiene sentido la opinión de los expertos, la probabilidad de un suceso es una medida del grado de creencia de una persona en el acaecimiento de ese suceso. La probabilidad no es una propiedad inherente a los sucesos, y desde este punto de vista todas las evaluaciones posibles son válidas. Ahora bien, cuando estas opiniones van a ser utilizadas en temas de gran importancia o relevancia social, como puede ser una evaluación probabilista de seguridad de una instalación nuclear o radiactiva, el receptor de las mismas tiene derecho a plantear la cuestión de porqué se deberían creer los resultados de tal o cual ejercicio de juicio de expertos en vista de los posibles hechos subsecuentes, cuestión que cobra mayor relevancia si se tienen en cuenta los sesgos que amenazan a las opiniones de los expertos. Esto lleva directamente a la necesidad de diseñar métodos para *evaluar* la bondad o precisión de un experto.

III.1. Los sesgos del conocimiento

Para mostrar los sesgos del conocimiento más relevantes es importante agruparlos en torno a tres aspectos ligados a las deficiencias generales mencionadas anteriormente. En los siguientes apartados se hará referencia a los sesgos asociados al manejo de las fuentes de información, a la diferencia entre los razonamientos causales y estadísticos y a las estrategias simplificadoras utilizadas para abordar los problemas.

III.1.1. Sesgos asociados a las fuentes de información

A la hora de elaborar juicios es fundamental analizar la información de la que se dispone y atribuir una importancia relativa a cada una de las fuentes. Este proceso puede verse sesgado por una falsa sensación de robustez de unos datos frente a otros debido a una interpretación errónea de su abundancia, consistencia y fiabilidad, así como por aspectos ajenos a los mismos que tienen que ver con el modo en que se presenta la información.

Falsa interpretación de la abundancia, consistencia y fiabilidad de los datos

Un resultado básico de estadística es que tanto más fiable es un resultado de una inferencia cuanto mayor es el número de datos en que ésta se basa. Esto tiene la lógica implicación de que aumenta la confianza en un juicio cuanto más *abundante* es la información en que éste se asienta.

Ahora bien, ha de tenerse cuidado con este resultado, ya que es cierto sólo si las fuentes de información de que se dispone son independientes; si son redundantes o están correlacionadas, su valor para asentar juicios en ellas disminuye. En el límite, si se aporta la misma información, de la misma fuente, dos veces, esto no debe hacer tener mayor confianza en las conclusiones que de ella se deriven. Tener dos copias de un artículo científico no hace adquirir más ciencia. En el caso general las cosas no están tan claras ya que éste suele consistir en tener varias fuentes de información con diversos grados de solapamiento entre ellas. Por lo tanto se debe estar prevenido contra la mera recopilación de datos que puedan estar correlacionados, en particular si ello lleva a ignorar otras posibles fuentes de información alternativas.

La *consistencia* se refiere al grado de concordancia entre la información aportada por las diversas fuentes. La consistencia entre las diversas fuentes supone que no existen discrepancias entre ellas acerca de un concepto o valor, pero no indica nada más. En revisiones bibliográficas muchas veces se encuentra una idea o el valor de un parámetro repetido hasta la saciedad en muchos artículos, dando sensación de robustez en la estimación de dicho parámetro o en la gestación de dicha idea. Al profundizar en el estudio la sorpresa suele ser grande al comprobar que todas las citas conducen a un solo artículo y que en él la estimación del parámetro fue grosera o la idea fue una hipótesis, no desmentida, pero tampoco probada. Lo que en un principio, por consistencia, parecía un dato sólido, pierde gran parte de su capacidad para basar predicciones en él. Además, la psicología del conocimiento ha documentado el hecho de que las personas normalmente tienden a eliminar la información conflictiva en lugar de intentar incorporarla a sus juicios. Según Hogarth ^[70] la reducción psicológica de la incertidumbre es una estrategia simplificadora muy útil para evitar el estado de ansiedad que supone la noción de que los sucesos son inciertos, situación ésta que es complicada y poco comfortable. Así pues, la consistencia puede ser una estrategia razonable para hacer juicios, pero siempre y cuando se comprueben los argumentos y sus premisas y se tenga en cuenta adecuadamente la información conflictiva.

Cuando la información se utiliza con el fin de construir un modelo predictivo ha de considerarse la *fiabilidad* de los datos. La fiabilidad es una medida del grado en que los datos reflejan la realidad. Una fuente de datos poco fiable no tiene capacidad predictiva alguna. Es famoso el caso de un investigador francés ^[71] que llegó a la conclusión, después de construir un modelo a partir de datos económicos, de que el aumento de los niveles de inversión industrial y el aumento de la inflación estaban relacionados. Los niveles de inversión se habían sobreestimado en un 35%, subestimándose además la inflación al inicio del período considerado. En muchos casos como éste se construye un modelo basado en datos no fiables y se trata de utilizarlo para predecir valores extremos. Esto es un grave error. En casos de datos no fiables la mejor estimación es la media; ha de efectuarse un reajuste de *regresión a la media*. Igual reflexión merece el caso de correlaciones estadísticas basadas en datos fiables pero que no son lo bastante buenos, que presenta bajo coeficiente de de-

terminación o algunos coeficientes no significativamente distintos de cero. En estos casos la mejor estimación vuelve a ser la media, no teniendo sentido utilizarlas para predecir valores extremos.

Diferente interpretación de la información según el modo en que se presenta

Además de la cantidad y la calidad de los datos también se debe tener en cuenta el *modo* en que se presenta esa información, ya que se pueden inducir falsas apreciaciones de su importancia relativa ^[70]. El orden de presentación puede afectar significativamente a los juicios, dándose a veces más importancia a la primera información (*efecto primacía*) y a veces a la última (*efecto sorpresa*). También el intervalo temporal entre el suministro de informaciones es de gran importancia, puesto que se ha mostrado frecuentemente que los sujetos se ven muy influenciados por sus primeras hipótesis, necesitando mucha información posterior en contra para variarlas. Asimismo la presentación de una información enmarañada puede tener un efecto nefasto.

III.1.2. Sesgos asociados a la interpretación causal del mundo

Según ya se comentó, al ser humano normalmente le cuesta mucho trabajo convivir con la información conflictiva, o lo que es lo mismo, con la incertidumbre, debido a la ansiedad que le supone saber que los sucesos son inciertos. Por ello es bastante proclive a buscar relaciones causales para basar en ellas sus predicciones como medio para reducir la incertidumbre, de modo que su concepción del mundo es esencialmente causal. Como consecuencia, el ser humano potencia su capacidad para buscar las posibles causas de los sucesos y en contrapartida descuida la relativa a la comprensión de los hechos en términos de probabilidad. No se olvide que las relaciones causales y estadísticas son muy diferentes: las primeras son en un único sentido, si *A* causa *B*, *B* no tiene porqué causar *A*, sin embargo en estadística si *A* está relacionado con *B*, *B* está relacionado con *A*; en este caso la relación es en ambos sentidos. Esta característica del comportamiento humano es de gran importancia, puesto que su habilidad para evaluar distribuciones de probabilidad dependerá de su mayor o menor aptitud para manejar los conceptos estadísticos en general.

Falsa interpretación de la relación causal

Einhorn y Hogarth ^[71] indican que para establecer las posibles causas de un suceso las personas se sirven del análisis de cuatro factores:

1. El contexto.
2. Los indicadores imperfectos de relación causal (orden temporal- causa precede a efecto, covariación, contigüidad espacio-temporal y similitud causa-efecto).

3. Los posibles modos de combinar contexto e indicadores.
4. La verosimilitud de las explicaciones alternativas.

Ya que a la hora de establecer relaciones causales es determinante el contexto, el punto hasta el que los indicadores apuntan a un escenario coherente y la potencia de explicaciones alternativas, este planteamiento en sí es razonable, especialmente si el último punto, la búsqueda de explicaciones alternativas, se expresa bien. Sin embargo dejarse llevar por este tipo de análisis de modo sistemático, sin hacer hincapié especial en las explicaciones alternativas, puede llevar en ocasiones a errores.

A la hora de establecer escenarios, una sucesión coherente de sucesos, que puede ser larga y bien detallada, puede ser aparentemente más verosímil que los sucesos individuales que la componen, con lo que se estaría utilizando la coherencia causal de la sucesión como prueba de la verosimilitud de su acaecimiento. Es tal la fuerza del razonamiento causal que a veces se atribuye más verosimilitud a la causa seguida del efecto que a la apreciación del efecto en solitario (recuérdese que un efecto podría tener más de una causa) o a la apreciación de causa y efecto simultáneamente. Además, en este último caso se corre el riesgo de confundir la probabilidad de la intersección de causa y efecto con la probabilidad condicionada del efecto dada la causa ^[71].

Otro problema derivado de la percepción causal del mundo es la *confusión del inverso*. En términos de probabilidad esto consiste en confundir $P(x/y)$ con $P(y/x)$. Para comprender qué significa y ver su importancia considérese el ejemplo siguiente ^[67]: una persona desea saber si padece una enfermedad, para lo cual se hace un análisis médico; le da positivo, es decir, indica que padece la enfermedad. Sean x el suceso “padecer la enfermedad” e y el suceso “resultado positivo del análisis”. Es muy común la confusión arriba mencionada. Sin embargo obsérvese que $P(x/y)$ es la probabilidad de padecer la enfermedad dado que el análisis confirma la existencia de ésta, siendo lo que aporta la bibliografía médica $P(y/x)$, la probabilidad de detectar la enfermedad cuando esta se da (la prueba se aplica a muchos pacientes de los que se sabe sin ambigüedad que padecen la enfermedad, y se registra la fracción de ellos en que la prueba detecta la enfermedad, que se asigna a $P(y/x)$, y que es la principal medida que se suele dar de la eficacia de tal prueba). La gente en general no distingue entre ambas, siendo $P(x/y)$ y $P(y/x)$ iguales sólo si $P(x) = P(y)$. La confusión se debe a una interpretación errónea del orden temporal en que se perciben causa y efecto. Si la prueba es eficaz, que se dé x casi implica que se dé y de forma segura, de modo que x es la causa de y , el efecto. Sin embargo se conoce primero en el tiempo el efecto, lo que hace que se interprete la relación causal a la inversa.

Incapacidad para manejar intuitivamente los conceptos estadísticos

Dos importantes sesgos debidos a la dificultad para razonar de modo probabilista son la *insensibilidad a las proporciones base* y la *falta de capacidad para actualizar la información*. Al enfrentarse

a la tarea de resolver un problema se suele contar con dos tipos de información: la información general sobre el problema previo al planteamiento del mismo y la información adquirida *ad-hoc* para resolverlo. En general se tiende a ignorar la información general (puede llamarse también base o *a priori*), centrando toda la atención en la información específica. Este planteamiento es incorrecto. Basta para ello recordar que en ausencia de ella el juicio habría que asentarlo totalmente sobre la información general. El modo correcto de actuar es considerar ambos tipos de información y combinarlas mediante la fórmula de Bayes para obtener la información *a posteriori*. Sin embargo, tal y como indica la experimentación, el esquema de la fórmula de Bayes, que es necesario para actualizar la información, no se encuentra entre los mecanismos intuitivos de inferencia de las personas.

Para ver el efecto de la información base y el uso de la fórmula de Bayes continuemos con el ejemplo anterior. Supóngase que la eficacia de la prueba médica es del 90%, es decir, $P(x/y) = 0.9$, mientras que la probabilidad de que la prueba dé resultado positivo cuando la persona no padezca la enfermedad es del 10%, es decir, $P(y/\bar{x}) = 0.1$. Dado que realizar la prueba es gratis e indoloro, la persona decide hacérsela. Para su sorpresa comprueba que la prueba da positivo, indicando que padece la enfermedad. ¿Debe considerar que tiene un 90% de probabilidad de padecer la enfermedad? Siendo cierto que las razones para hacerse la prueba eran correctas, que no se la hizo por tener cierta evidencia de poder estar contagiado, como apreciar síntomas de la enfermedad o convivir con personas que la padecen, siendo ésta contagiosa, se está olvidando un dato: la información base. La persona va a las estadísticas y comprueba que estimaciones serias cifran la fracción de afectados por la enfermedad en torno al 1 por 10.000, es decir, $P(x) = 0.0001$. Si se aplica la fórmula de Bayes se obtiene que $P(x/y) = 0.0009$. La bondad de la prueba hace que se atribuya a la posibilidad de padecer la enfermedad una verosimilitud 9 veces mayor que al común de los mortales, pero aún así sigue siendo menor a una milésima, muy inferior al valor 0.9 que intuitiva e incorrectamente se asociaba $P(x/y)$ y que atemorizaba. El planteamiento recién realizado no está exento de críticas, ya que en ocasiones no está nada claro cual es la información base que hay que utilizar.

Otro fenómeno que se produce habitualmente entre las personas, incluso entre aquellos con ciertos conocimientos de teoría de probabilidades, es *confundir la media y la mediana* de una variable aleatoria. Se ha observado reiteradamente que al pedir a una persona que evalúe una media suele evaluar una mediana. Probablemente se deba a la mayor dificultad conceptual que entraña evaluar una media, que requiere calcular un sumatorio o una integral, frente a la sencillez de evaluar una mediana. También está comprobado experimentalmente que en general no se evalúa bien la varianza de las variables, lo que conduce a distribuciones de probabilidad poco dispersas, fenómeno que se ha dado en llamar *sobreconfianza*. Este problema se ve agravado por la tendencia de las personas a *sobreestimar las probabilidades pequeñas* y a *subestimar las probabilidades grandes*. Como se verá posteriormente la

sobreconfianza también puede deberse a la utilización de una estrategia típica, llamada *anclaje y ajuste*, para evaluar la incertidumbre de un parámetro. Mencionemos también la dificultad de las personas para evaluar la probabilidad de ocurrencia de sucesos simultáneos y en general de distribuciones de probabilidad conjunta para varias variables.

Finalmente es de destacar la tendencia de las personas a *ajustar sus distribuciones subjetivas al esquema normal*. Winkler ^[72] opina que en el caso de personas con formación matemática esto es debido al énfasis que se hace sobre esa distribución en los cursos de estadística, mientras que Hogarth ^[70] lo asocia a la tendencia de las personas a reducir la incertidumbre en su entorno, ya que la simetría, la principal característica de la curva normal, es uno de los mecanismos organizadores más poderosos de los que hace uso el ser humano para tal fin, y en consecuencia a las personas les resulta más sencillo pensar en términos simétricos que en términos desequilibrados.

III.1.3. Estrategias simplificadoras

Cuando las personas se mueven en un entorno de incertidumbre y tienen que tomar decisiones deben acudir necesariamente a suposiciones sobre la probabilidad de los sucesos inciertos. Está demostrado que el ser humano confía en un cierto número de estrategias simplificadoras o principios heurísticos que convierten la tarea de asignar probabilidades, de por sí complicada, en una secuencia de operaciones simples. En general estos principios heurísticos son bastantes útiles, pero algunas veces conducen a errores sistemáticos y severos, tal y como han mostrado Tversky y Kahneman ^[73]. Estos autores distinguen tres estrategias simplificadoras fundamentales: *representatividad*, *disponibilidad* y *anclaje y ajuste*.

III.1.3.1. Representatividad

Cuando se juzga la probabilidad de que un objeto o suceso A pertenezca a una clase o proceso B se confía normalmente en el principio heurístico de la *representatividad*, por el cual las probabilidades se evalúan en la medida en que A es representativo de B , es decir, según el grado en que A recuerda a B . Así, cuando A es altamente representativo de B se estima que la probabilidad de que el objeto o suceso A pertenezca a la clase o proceso B es muy alta, mientras que si A no es similar a B la probabilidad anterior se estima pequeña. Esta aproximación para estimar probabilidades puede ser en ocasiones útil, pero en general hay que ser precavidos con ella porque puede conducir a serios errores como se verá a continuación.

Insensibilidad al tamaño muestral

Para evaluar la probabilidad de obtener un resultado particular asociado a una muestra sacada de una población específica típicamente se aplica el mecanismo de representatividad, de modo que la verosimilitud del resultado depende de su similitud con los parámetros homólogos de la

población. Por ejemplo, la probabilidad de que en una muestra aleatoria de diez hombres se obtenga una altura media de 180 cm se juzga en función de la similitud de este número con la altura media de la población masculina. Obsérvese que al proceder de este modo se está asumiendo que los resultados son esencialmente independientes del tamaño muestral, lo cual es un grave error.

Tversky y Kahneman ^[73] muestran a través del siguiente ejemplo que los sujetos fallan en intuir el papel del tamaño muestral incluso cuando se les enfatiza en la formulación del problema. A 95 estudiantes se les planteó éste enunciado: “En una ciudad existen dos hospitales. En el mayor de ellos nacen aproximadamente 45 niños al día, mientras que en el otro nacen 15. Como es sabido, aproximadamente el 50% de los nacimientos corresponde a varones. Sin embargo este porcentaje muestra cierta variabilidad en función del día particular que se considere. A veces es mayor que el 50% y a veces menor. Durante un período de un año cada hospital registró los días en los cuáles más del 60% de los nacimientos fueron de varones. ¿Qué hospital piensa usted que registró un mayor número de tales días?: a) el hospital más grande (21), b) el hospital más pequeño (21), ó c) los dos hospitales registraron aproximadamente el mismo número de días (53)”. Los números entre paréntesis indican los estudiantes que optaron por cada respuesta.

Obsérvese que la mayor parte de los encuestados opinaron que la probabilidad de que más del 60% de los nacimientos correspondan a varones era independiente del tamaño del hospital, presumiblemente porque ambos sucesos, “nacer en un hospital grande” y “nacer en un hospital pequeño” son igualmente representativos de la población general. Sin embargo, como se puede comprobar en la figura 3.1, dicha probabilidad es mucho mayor en el hospital pequeño ($1 - 0.849 = 0.151$) que en el grande ($1 - 0.932 = 0.068$). Obsérvese que las probabilidades que hay que calcular son las de que sendas distribuciones binomiales de parámetros $n = 15$ y $p = 0.5$, y $n = 45$ y $p = 0.5$ tomen valores mayores que 9 la primera y que 27 la segunda. Es más probable que en una pequeña muestra, constituida en este caso por los niños nacidos en el hospital pequeño, el número de nacimientos de varones se desvíe significativamente del 50%. Con carácter general, en promedio se obtienen mayores desviaciones relativas, no absolutas, respecto a lo esperado en muestras pequeñas que en muestras grandes.

Otro ejemplo de insensibilidad al tamaño muestral inducido por el mecanismo de representatividad es la *ley de los números pequeños*, efecto bautizado por Tversky y Kahneman ^[73], que consiste en esperar, en secuencias aleatorias, el mismo comportamiento a corto y largo plazo. Es decir, si se lanza cinco veces una moneda las personas normalmente esperan que se den tres caras y dos cruces o viceversa, ya que suponen que esta secuencia es más representativa del concepto de aleatoriedad que la sucesión de cinco caras seguidas. Sin embargo esta última secuencia tiene, para el caso de una moneda perfectamente equilibrada, una probabilidad no despreciable, de 1 en 32, aproximadamente del 3%.

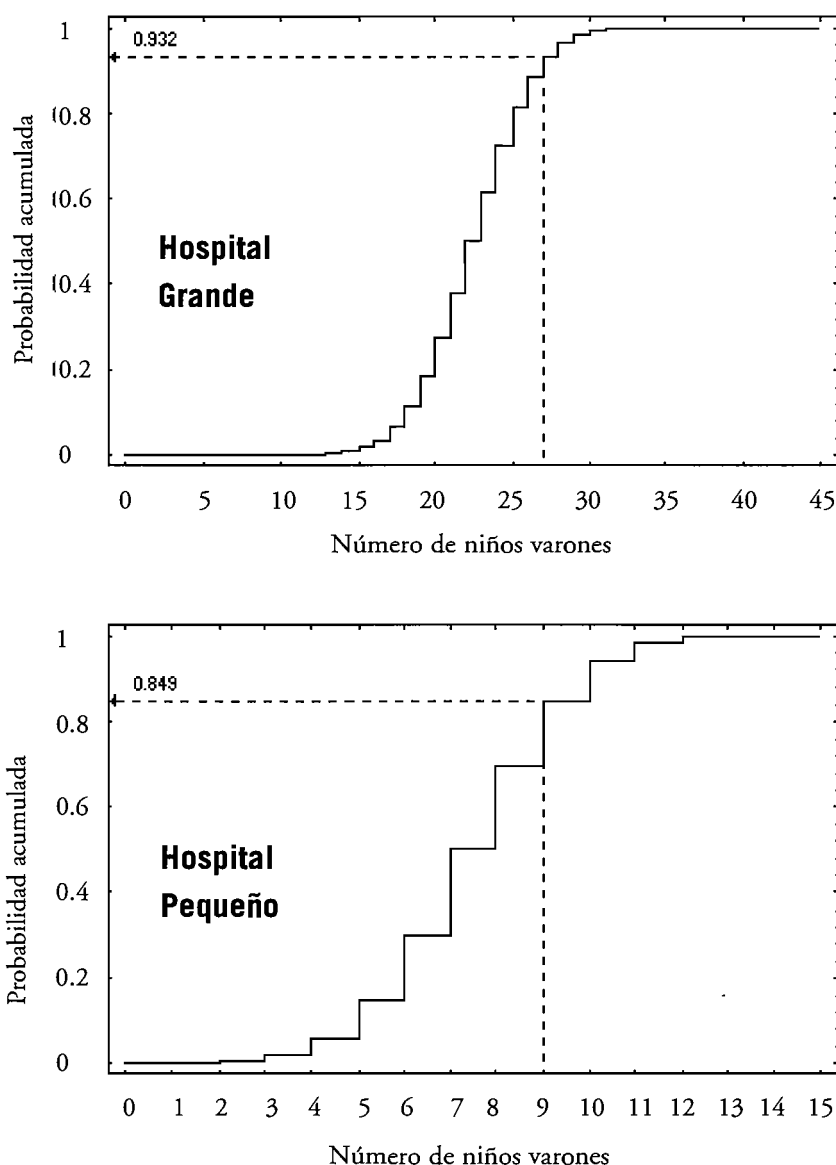


Figura 3. 1. Funciones de distribución de las variables aleatorias binomiales que siguen el número de varones nacidos en un hospital pequeño y en uno grande.

III.1.3.2. Disponibilidad

Existen situaciones en las cuales se evalúa la probabilidad de un suceso por la facilidad con la cual se pueden recordar ejemplos de ese suceso. Este mecanismo heurístico se denomina disponibilidad. Muchas veces la *disponibilidad* es un procedimiento útil para evaluar probabilidades o frecuencias, ya que los sucesos que ocurren frecuentemente se recuerdan mejor que los que ocurren ocasionalmente. Sin embargo la facilidad con la que se puede recordar un suceso se puede ver afec-

tada por otros factores distintos de su frecuencia real, por lo que al guiar los juicios según el mecanismo de disponibilidad se pueden introducir sesgos en los mismos.

Falsa interpretación de la capacidad para recordar

Cuando el tamaño de una clase se evalúa por disponibilidad resulta que aquellas cuyos ejemplos son fáciles de recordar parecen más numerosas que las clases cuyos ejemplos son más difíciles de recordar, a pesar de que ambas clases puedan tener la misma frecuencia. La facilidad para recordar ejemplos se ve afectada por cuestiones tales como la experiencia personal reciente, la asociación de aspectos dramáticos o destacables a los sucesos o la concurrencia de tales sucesos en personas famosas, por poner tan sólo algunos ejemplos. De este modo resulta que cuando la experiencia y la memoria de una persona acerca de un suceso se corresponde adecuadamente con la frecuencia real del suceso entonces el mecanismo de disponibilidad proporcionará resultados razonables, pero cuando el recuerdo se ve potenciado o disminuido por hechos ajenos al problema entonces llevará a una sobreestimación o subestimación, según el caso, de las frecuencias.

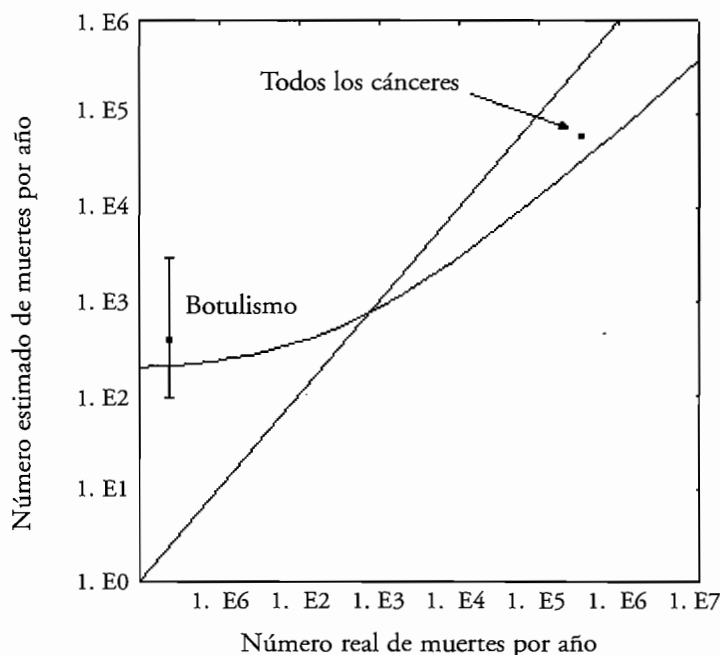


Figura 3. 2. Ajuste de las medias geométricas de las estimaciones del número de muertes anuales, en Estados Unidos en un año y por diversas causas, frente a su número real^[49].

Un ejemplo citado hasta la saciedad debido a Lichtenstein y colaboradores^[49] es aquel en que a un grupo de norteamericanos con buen nivel cultural se les pidió que estimasen el número de muertes debidas a diversas causas (homicidio, electrocución, enfermedades cardiovasculares, etc.) que ocurrían cada año en los EEUU. Para ello se les dio un dato: anualmente en accidente de tráfi-

co mueren aproximadamente 50.000 personas. La figura 3.2 refleja la curva que mejor se ajusta a la media geométrica de las estimaciones frente a los valores reales. Si estas personas hubieran sido buenos estimadores el resultado habría ido aproximadamente por la diagonal (número de muertes estimadas es aproximadamente igual al número de muertes reales). Sin embargo se ve que no fue así. En la parte derecha de la curva (mayores ordenadas) se encuentran los puntos debidos al conjunto de todos los cánceres y enfermedades coronarias entre otras, produciéndose como se ve una clara subestimación. Sin embargo, contribuyendo a la parte izquierda de la curva (menores ordenadas) se encontraban enfermedades como el botulismo, que muestra gran sobreestimación. La explicación dada a estos resultados es que todos los casos de botulismo que se produjeron en el país ese año (dos) salieron en los periódicos, siendo muy sencilla su rememoración. Sin embargo, a una causa común de muerte como es el cáncer sólo atienden las personas cuando un conocido muere de ello. Obsérvese que en la zona de menores ordenadas el sesgo es de dos órdenes de magnitud.

Falsa interpretación de la capacidad para imaginar

Los sesgos debidos al mecanismo de disponibilidad también se pueden producir por las variaciones en la facilidad con la cual se puede imaginar un suceso. Esto ocurre típicamente en aquellos casos en que se pide a un sujeto que evalúe la probabilidad de ocurrencia de un hipotético escenario o contexto. Esta probabilidad dependerá tanto de la facilidad con que puede concebir ese escenario como de su actitud hacia las connotaciones del mismo, aspectos ambos que sin embargo no tienen ninguna relación con la frecuencia real del suceso. Por ejemplo supóngase que un grupo intenta evaluar el riesgo que supone una expedición en plan de aventura a un país extraño y lejano. Para ello intentará informarse de los posibles peligros y entonces imaginará las contingencias que podrían ocurrir y que la expedición no podría afrontar por falta de preparación. Evidentemente la expedición parecerá más peligrosa cuanto más vívidas sean retratadas estas contingencias, con lo que asignará un alto riesgo a la misma. Y a la inversa, se puede subestimar el riesgo si algunos peligros potenciales son difíciles de concebir o simplemente no son mentalmente planteados.

III.1.3.3. Anclaje y ajuste

Cuando se intenta evaluar los posibles valores de un parámetro desconocido es frecuente utilizar una estrategia consistente en evaluar una primera estimación del parámetro (*anclaje*), normalmente asociado a una medida de centralización como la media o la mediana, y tratar de reflejar después la incertidumbre sobre el mismo ampliando el rango de posibles valores a su izquierda y a su derecha (*ajuste*). El problema que se presenta en muchas ocasiones es que el efecto del primer valor es muy centralizador, no llevando en general a una ampliación del rango tan grande como cabría esperar dado el estado de ignorancia sobre el parámetro. En general el efecto centralizador del anclaje tiene mucho que ver con la falta de imaginación, relacionado con la

estrategia de disponibilidad, para encontrar situaciones en las cuales valores más extremos de los parámetros fueran verosímiles, siendo raramente suficiente el ajuste para caracterizar apropiadamente la incertidumbre.

Sobreconfianza

Al evaluar una distribución de probabilidad mediante anclaje y ajuste es probable que se obtenga una distribución muy poco dispersa. Como ya se mencionó en otro lugar este sesgo se denomina *sobreconfianza*. Probablemente el modo en que mejor se percibe el fenómeno de la sobreconfianza es cuando se realiza un proceso de *calibrado*, como se verá en este mismo capítulo al hablar de la evaluación de los expertos.

Un ejemplo del sesgo inducido por el mecanismo de anclaje y ajuste lo proporcionan Tversky y Kahneman ^[73]. Preguntados dos grupos de personas por el porcentaje de países africanos en la ONU se les proporcionó a cada uno de ellos un dato de partida, en concreto 10% a un grupo y 65% al otro. Aún cuando estos datos habían sido determinados de antemano, se les hizo creer a los dos grupos que se sacaron al azar entre 0 y 100. A los individuos de ambos grupos se les pidió hacer sus estimaciones separándose del valor inicial en el sentido y cuánta que considerasen necesario. La mediana de las estimaciones del primer grupo quedó en 25%, la del segundo en 45%, mostrando claramente el sesgo inducido. Otro ejemplo es el proporcionado por la figura 3.3, que corresponde al experimento de Lichtenstein y colaboradores ya comentado ^[49]. La curva inferior resultó de repetir el experimento pero suministrando otro dato: el número de muertes anuales por electrocución es aproximadamente 1.000. El efecto del nuevo anclaje supuso un desplazamiento hacia abajo de la curva. No merece más comentarios.

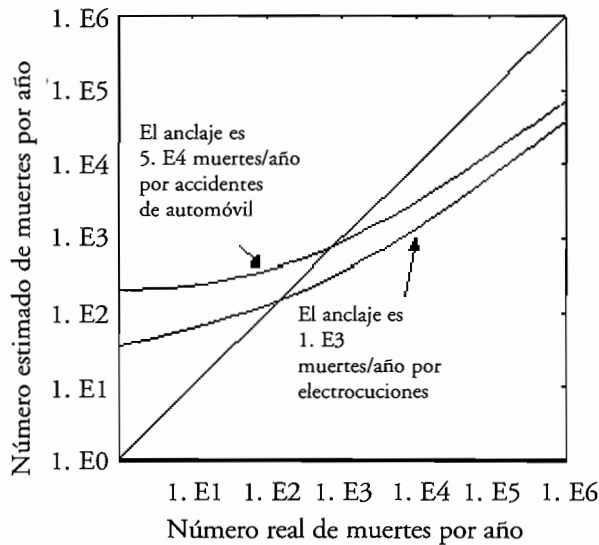


Figura 3. 3. Mejores ajustes de la media geométrica de las estimaciones del número de muertos en Estados Unidos por diversas causas para dos valores diferentes del anclaje inicial ^[49].

III.2. Los sesgos motivacionales

Estos sesgos tienen que ver con posturas predefinidas del experto, legítimas en unos casos e ilegítimas en otros, frente al proceso de objetivación y lo que en él se pueda evaluar. Los sesgos principales de este tipo son:

- **Sesgo de gestor**

Se da en un experto cuando en el parámetro en cuestión se ve más un objetivo que alcanzar que una incertidumbre que caracterizar. Corresponde a posturas como “pues si el jefe quiere hacer mínimo este parámetro, se hace mínimo y ya está”.

- **Sesgo de experto**

Corresponde a una reacción del experto frente a quienes le han elegido para participar en el proceso. Si lo han elegido es porque es realmente un experto, y un experto no debería tener gran incertidumbre sobre aquello que se cree que conoce. Puede dar lugar a serios problemas de sobreconfianza.

- **Sesgo de conflicto de intereses**

Éste puede darse porque el experto reciba todos o parte de sus ingresos de aquel que solicita sus servicios como experto y se sienta obligado a apoyar la opinión oficial u oficiosa de éste. También puede darse con motivo de que como consecuencia de determinados posibles resultados del proceso pueda resultar beneficiado o perjudicado (se le encomiende realizar un proyecto de investigación o no).

- **Sesgo de conservadurismo**

Puede adoptar dos formas. La primera es que el experto sepa de la influencia que el parámetro pueda tener en el modelo que se utilice y a la hora de estimarlo prefiere pecar de conservador en vez de esforzarse en ser más preciso. La segunda consiste en tratar de contrarrestar *a priori* una posible sobreconfianza, lo que puede llevarlo a extender el rango del parámetro más allá de donde realmente está convencido que debería llegar. En general este sesgo denota aversión al riesgo.

III.3. La evaluación de los expertos

Una vez que se ha obtenido de un experto sus probabilidades subjetivas para los sucesos que nos interesan, cabe la posibilidad de evaluar la fiabilidad de dichas probabilidades. Para ello es necesario un método que defina y mida la calidad de los juicios subjetivos, cuestión que parece bastante

difícil en función de la propia naturaleza de la probabilidad subjetiva. Una medida indirecta de esta calidad pueden ser los dos tipos de cualidades que distinguen Winkler y Murphy ^[49] en un experto: el *conocimiento en la materia* se refiere al conocimiento que el experto posee acerca de la magnitud que se quiere evaluar, mientras que el *conocimiento en normativa* hace alusión a la capacidad del experto para expresar sus creencias en forma probabilista. Por ejemplo un meteorólogo puede tener un gran conocimiento de meteorología que le permitirá hacer juicios valiosos sobre, por ejemplo, la probabilidad de lluvia al día siguiente. Sin embargo, un analista de juicio de expertos poseerá mayor conocimiento en normativa y quizá sea más capaz que el meteorólogo de plasmar sus juicios, los del meteorólogo, en probabilidades.

En general se acepta que ambos tipos de conocimientos son muy importantes para elaborar juicios de calidad. Desde luego es imprescindible que los temas sean evaluados por expertos en esas áreas, ya que, en un caso extremo, si el experto no conoce nada sobre el tema que se discute nunca será posible extraer información útil de él. De hecho algunos estudios experimentales ^[74] han encontrado que el conocimiento en la materia disminuye la sobreconfianza en las evaluaciones. Y respecto al conocimiento en normativa Lichtenstein y colaboradores ^[74] concluyen también que se reduce la sobreconfianza cuando se comprende adecuadamente el lenguaje de las probabilidades, ya que entonces los juicios se elaboran con menor dificultad. Winkler ^[72], tras un estudio experimental muy significativo al respecto, señala que la falta de conocimiento en normativa puede introducir sesgos muy importantes, ya que se corre el riesgo de que el experto decida realizar la labor que se le ha encomendado a pesar de no entenderla o entenderla de forma imperfecta.

A pesar de que los conceptos de conocimiento en la materia y en normativa ayudan a centrar el tema de la evaluación de los expertos siguen siendo poco operacionales. Se puede comprender fácilmente que el único modo de cuantificar los conocimientos es comparar las predicciones de los expertos con los datos empíricos sobre el acaecimiento de los sucesos que se evalúan. Según este criterio un experto con calidad debería atribuir altas probabilidades a los sucesos que realmente ocurren y bajas probabilidades a los que no. Siendo correcto este planteamiento, adolece de dos defectos fundamentales; en primer lugar, si se recurre a un experto es debido a la dificultad existente en obtener por otro procedimiento los parámetros que nos interesan, y en segundo lugar, cabe preguntarse qué utilidad tiene una evaluación *a posteriori* en el caso de sucesos únicos en su tipo. Dadas estas circunstancias, es necesario recurrir a sucesos pasados sobre cuyo acaecimiento se tiene certeza. Este es el planteamiento que hace la técnica de las *curvas de calibrado*. Otro método ampliamente utilizado es el de las *reglas de puntuación*, que a pesar de lo dicho realizan una evaluación *a posteriori* del experto en función de los hechos que realmente ocurren. Por ello se aplican típicamente a aquellos casos en que el suceso que se evalúa se repite periódicamente, por ejemplo para medir la capacidad de predicción de los meteorólogos.

III.3.1. Curvas de calibrado

Se dice que un experto está bien calibrado cuando las probabilidades que evalúa para los sucesos se corresponden con sus frecuencias empíricas. Así, en un conjunto de sucesos al cual asigna una probabilidad 0.8 deben ocurrir aproximadamente el 80% de ellos si el experto está bien calibrado. Este es el principio en el que se basa la construcción de una curva de calibrado. Normalmente se pregunta al experto sobre su grado de creencia en la veracidad de proposiciones sobre las cuáles posee algún tipo de conocimiento relevante pero imperfecto. Las cuestiones que se someten a la evaluación del experto se refieren a sucesos tales como el número de habitantes de un país, las fechas de hechos históricos o el significado de ciertas palabras.

Para construir la curva de calibrado para un conjunto de evaluaciones de probabilidades discretas las proposiciones se clasifican en grupos con igual o parecida probabilidad asignada. Supóngase que n proposiciones han recibido probabilidad p , de las cuáles n_p son verdaderas. Si el experto está bien calibrado entonces $p = (n_p / n)$, mientras que si no lo está $p \neq (n_p / n)$. Si para cada grupo se compara su probabilidad p con la fracción (n_p / n) correspondiente se obtendrá una curva de calibrado como la mostrada en la figura 3.4. Un experto *bien calibrado o ideal* dará lugar a una curva muy ajustada a la diagonal. Un experto *subconfiado* con mucha incertidumbre evalúa las probabilidades muy próximas a 0.5 (curva más vertical); pero es mucho más frecuente el caso del experto *sobreconfiado*, en cuyo caso las probabilidades se evalúan muy próximas a la certidumbre total (0 ó 1, curva más horizontal).

Una curva de calibrado análoga se puede construir para evaluar las distribuciones continuas de parámetros desconocidos. En este caso el experto asigna funciones de distribución a parámetros cuyos valores puedan conseguirse con cierta facilidad. Con esos datos se construyen gráficas como la presente en la figura 3.5 en la que se representan en abscisas cuantiles y en ordenadas la fracción de evaluaciones realizadas en que el parámetro requerido resultó ser inferior al valor correspondiente del cuantil examinado.

La curva de calibrado de la figura 3.5 indica que el 45% de las veces el valor real del parámetro resultó ser inferior al cuantil 0.25 de la distribución generada en cada caso. Sobre estas curvas de calibrado pueden definirse tres medidas de interés: El *sesgo en la mediana*, el *índice intercuartílico* y el *índice de sorpresa*. Este último puede desglosarse en índice de sorpresa inferior y superior. El sesgo en la mediana indica la diferencia entre la fracción de veces que el parámetro real resultó inferior a la mediana y 0.5. El índice intercuartílico indica la fracción de veces que el parámetro real tomó valores entre los cuantiles 0.25 y 0.75. El índice de sorpresa indica la fracción de veces que el parámetro resultó ser inferior al cuantil 0.01 o superior al cuantil 0.99. Al igual que antes, un experto bien calibrado producirá una curva próxima a la diagonal, con sesgo en la mediana casi nulo, índice

intercuartílico aproximadamente igual a 0.5 e índice de sorpresa entorno a 0.02. Un experto sobreconfiado, como el caso de la figura 3.5, da lugar a índices intercuartílicos bastante menores que 0.5 (0.25 en la figura), e índices de sorpresa superiores a 0.02 (0.15 en la figura).

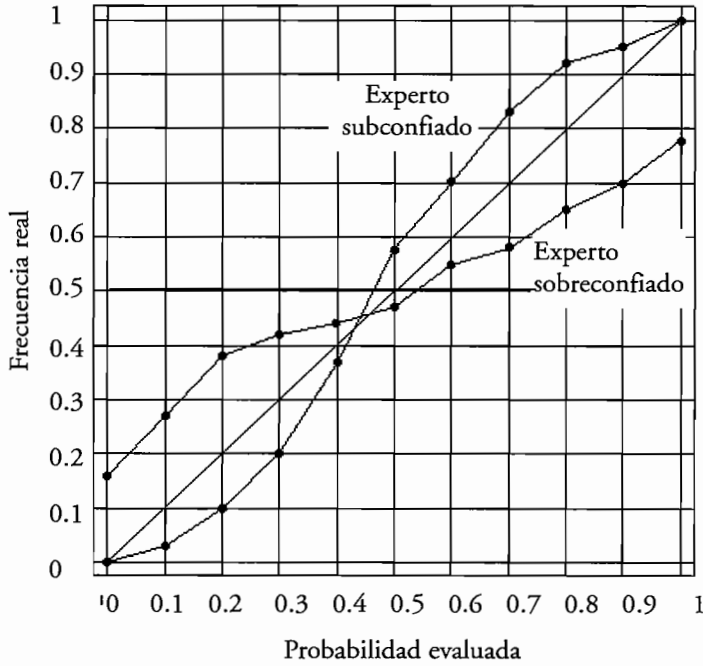


Figura 3.4. Curva de calibrado en el caso discreto.

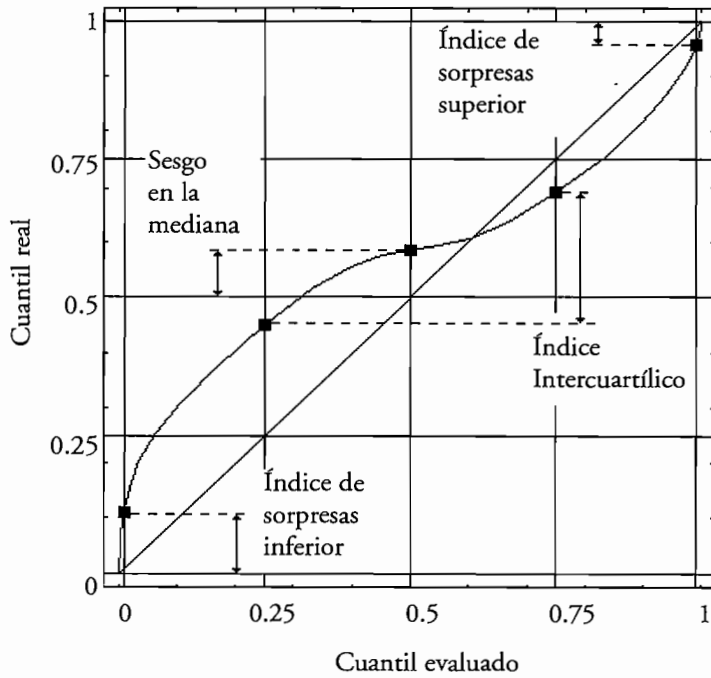


Figura 3.5. Curva de calibrado para el caso continuo.

III.3.2. Reglas de puntuación

Inicialmente las reglas de puntuación o “*scoring rules*” se diseñaron para obligar a los asesores a que hicieran corresponder sus juicios con sus verdaderas creencias, ya que se supone que el esquema de pérdidas-ganancias es una excelente base para motivarles y animarles a que realicen su trabajo con la mayor precisión posible. Considérese una partición $\{E_i\}_{i \in I}$ de sucesos mutuamente excluyentes sobre la cual un asesor evalúa la distribución $\vec{r} = (r_1, r_2, \dots, r_i, \dots)$, aún cuando sus creencias verdaderas son $\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots)$. De este modo el asesor sólo expresará esas verdaderas creencias cuando $\vec{r} = \vec{p}$. Una *regla de puntuación* es una función del suceso que realmente ocurre y de \vec{r} : el asesor recibe una puntuación $S_k(\vec{r})$ cuando acaece el suceso k . Entonces la puntuación esperada por el asesor es $S(\vec{r}, \vec{p}) = \sum_{k \in I} p_k S_k(\vec{r})$ y se dice que una regla de puntuación es estrictamente propia si $S(\vec{p}, \vec{p}) > S(\vec{r}, \vec{p})$ para todo $\vec{r} \neq \vec{p}$. Este esquema implica que el asesor hará máxima la puntuación esperada sólo cuando exprese sus auténticas creencias, supuesto que se dan otras condiciones necesarias como son que nunca viola la coherencia en sus evaluaciones, que comprende perfectamente tanto el método por el cual se obtienen las mismas como la propia regla de puntuación y que sus preferencias en cuanto a la puntuación esperada son lineales.

Se han desarrollado diversas reglas de puntuación que son estrictamente propias ^[49,76]. Entre las más frecuentemente utilizadas están la cuadrática, $S_k(\vec{r}) = 2 \cdot r_k - \sum_{i \in I} r_i^2$, la logarítmica, $S_k(\vec{r}) = \log r_k$, y la esférica $S_k(\vec{r}) = r_k / \sqrt{\sum_{i \in I} r_i^2}$. En el caso de dos sucesos mutuamente excluyentes la regla de puntuación más conocida es la de Brier, $S_1(r) = -(r-1)^2$, $S_2(r) = -r^2$ que se ha aplicado extensamente al campo de la predicción meteorológica y que se puede descomponer en tres términos que tienen en cuenta el conocimiento, la calibración y la resolución del experto ^[49]. Estas reglas de puntuación se pueden generalizar sin dificultad al caso de distribuciones continuas. Si el asesor evalúa una función de densidad $r(x)$ sobre la variable x entonces, por ejemplo, la regla logarítmica sería $S(r(x)) = \log r(x)$.

Sin embargo esta generalización presenta el inconveniente de ser muy dependiente de los valores puntuales de la función de densidad, no teniendo en cuenta la cantidad de probabilidad que existe a ambos lados de x . Matheson y Winkler ^[76] han desarrollado reglas de puntuación para el caso continuo que pueden tener en cuenta toda la evaluación en conjunto de distintos modos. Sean $R(x)$ la función de distribución evaluada por el experto, $F(x)$ su función de distribución real y u un valor arbitrario de la variable x seleccionado por el analista que divide el rango de la variable en los intervalos I_1 e I_2 , tal y como muestra la siguiente figura 3.6.

La regla de puntuación se diseña como una función del intervalo en que se encuentra x y de la función de distribución de probabilidad $R(u)$:

$$S_I(R(u)) = \{S_1(R(u)), S_2(R(u))\}, \tag{24}$$

donde S_1 se aplica si $x \in I_1$ y S_2 si $x \in I_2$. La puntuación esperada será:

$$S(F(u), R(u)) = F(u) S_1(R(u)) + [1 - F(u)] S_2(R(u)), \tag{25}$$

Si S_I es estrictamente propia entonces $S(F(u), F(u)) > S(F(u), R(u))$ y como no se conoce *a priori* el valor de u seleccionado por el analista entonces para hacer máxima su puntuación esperada el experto deberá expresar su verdadera opinión para cualquier valor de u .

Este esquema se puede hacer independiente del valor particular de u que se elija. Para ello basta con integrar la regla de puntuación sobre u , quedando:

$$S(R(\cdot)) = \int_{-\infty}^x S_2(R(u)) G(u) du + \int_x^{+\infty} S_1(R(u)) G(u) du, \tag{26}$$

donde la función de peso $G(u)$ se introduce cuando el analista quiere dar más verosimilitud a ciertos valores de u . Se puede demostrar sin dificultad que la puntuación esperada se expresa como:

$$S(F(\cdot), R(\cdot)) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(F(u), R(u)) G(u) du. \tag{27}$$

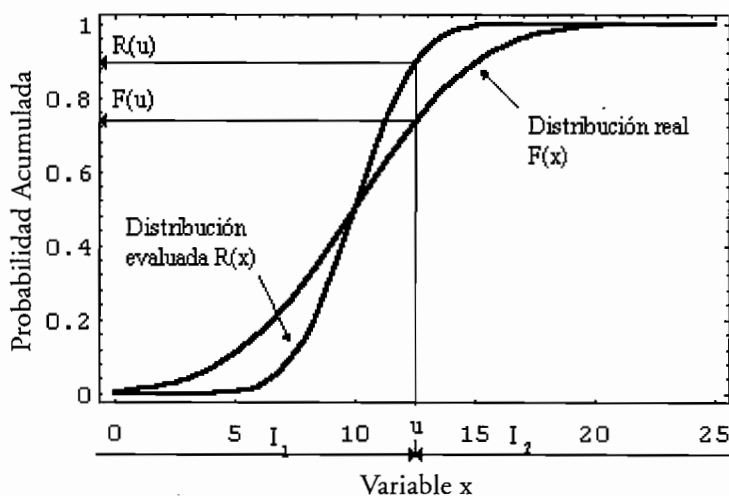


Figura 3. 6. Regla de puntuación de Matheson y Winkler ^[75].

A partir de sus orígenes las reglas de puntuación se han utilizado también para evaluar a los asesores, ya que si se observa que un cierto asesor obtiene sistemáticamente mejores puntuaciones que otro, entonces el primero se puede considerar razonablemente como más fiable que el segundo. Sin embargo

este procedimiento de motivación y evaluación no está exento de críticas. Según Hogarth ^[70] existen tres inconvenientes a tener en cuenta:

1. Se supone que el asesor posee una distribución "verdadera" que hay que obtener, cuando lo más frecuente es que no conozca *a priori* cuál es su "verdadera" opinión.
2. No se tiene en cuenta el coste (psicológico, de esfuerzo, de tiempo o de cualquier otro tipo) que supone para el evaluador meditar cuidadosamente su distribución para obtener el máximo beneficio, pudiendo ocurrir que el asesor considere que la recompensa por hacerlo bien no compensa ese coste.
3. El método no es comprendido por aquellas personas sin preparación matemática.

Además, Von Winterfeldt y Edwards ^[49] han mostrado que las reglas de puntuación son inevitablemente insensibles a pequeñas desviaciones de la estrategia óptima. No obstante Morgan y Henrion ^[49] creen que a pesar de estas deficiencias las reglas de puntuación son importantes para evaluar el comportamiento de los asesores.

III.4. El comportamiento de los expertos

La mayor parte de los resultados experimentales presentes en la bibliografía sobre sesgos del conocimiento están basados en estudios realizados con estudiantes respondiendo a preguntas de cultura general. Esto ha provocado que algunos resultados sean ampliamente debatidos y puedan, en ocasiones, no ser extrapolables a expertos. A Lindley ^[77] no le extraña que los psicólogos consideren al ser humano un mal evaluador de probabilidades, sobre todo si su capacidad para realizar tales evaluaciones se mide realizando preguntas como "*¿Cual cree usted que es la probabilidad de que haya más de 100.000 teléfonos en Gana?*".

Hogarth ^[70] opina que se deben dar dos condiciones para que un experto considere útil la tarea de evaluar probabilidades. Primeramente el tema tiene que tratar sobre algo con lo que el experto esté razonablemente familiarizado y, en segundo lugar, debe estimar que su evaluación mejora la situación del tema más que cualquier otro procedimiento alternativo que se pueda aplicar. Por ello advierte sobre gran parte de los estudios experimentales en el área de la psicología del conocimiento, en los cuales los temas han sido triviales y no se han utilizado expertos en los temas tratados ni en normativa.

Mullin ^[49] realizó una serie de estudios con expertos en las áreas de teoría de campos electromagnéticos e hidrogeología, extrayendo juicios suyos sobre su área de conocimiento y sobre temas de cultura general. Los resultados de estos estudios indicaban que había gran diferencia entre las estimaciones de probabilidades que hacían como expertos y como no expertos. Como expertos eran mucho más serios y cuidadosos al hacer las estimaciones, recopilando información sobre el parámetro y los procesos que lo

generan, identificando fuentes de incertidumbre y construyendo modelos para el mismo. También observó que en ambos casos se utilizaba la estrategia de anclaje y ajuste, pero en el caso de actuar como expertos basaban el ajuste más en sus conocimientos sobre el parámetro y factores relacionados. Mullin concluía opinando que la extrapolación de los resultados obtenidos con no expertos a expertos tiene límites reales, no pudiendo hacerse indiscriminadamente. Además estimaba que los expertos podían no tener tanta tendencia a la sobreconfianza como los no expertos, debiendo ser muy cuidadosos a la hora de aplicarles técnicas para atenuar este sesgo.

Para Morgan y Henrion ⁽⁴⁹⁾ la cuestión del comportamiento real de los expertos está sin resolver. Aunque existe evidencia de que al menos bajo ciertas circunstancias los expertos muestran un mejor comportamiento que los no expertos, no está claro cuáles son esas circunstancias ni en qué medida difiere el comportamiento de los unos frente al de los otros. Por lo tanto esa evidencia experimental no es suficiente para creer que los sesgos del conocimiento que se pueden presentar en una evaluación con expertos son menos serios que los que se han documentado en las pruebas con no expertos.

IV. Técnicas y protocolos de Juicio de Expertos

IV. Técnicas y protocolos de Juicio de Expertos

Las incertidumbres irreducibles a las que está sometida una evaluación de seguridad de una instalación nuclear, radiactiva o de cualquier otro tipo pueden ser de varios tipos, siendo necesario acudir a los expertos para su cuantificación o evaluación. A su vez, algunas de ellas pueden ser más importantes que otras. En general cuando una determinada incertidumbre irreducible se haya identificado como crítica para la evaluación habrá que recurrir a protocolos formales de objetivación del juicio de expertos. Estos protocolos se conciben como procesos estructurados en los que existe una interacción entre un analista o grupo de analistas y el experto con el fin de superar las dificultades potenciales que se pueden presentar durante un ejercicio de juicio de expertos, garantizando así la calidad de los juicios que se emitan. Roberds ^[78] resume estas dificultades como sigue:

1. *Pobre cuantificación de la incertidumbre.* Puede ocurrir que el experto no exprese la incertidumbre de forma coherente o apropiada, ya que, según se comentó en el capítulo anterior, es de esperar que los sujetos no entrenados en la teoría de probabilidades presenten problemas para cuantificar de forma precisa su incertidumbre.
2. *Pobre definición del problema de interés.* Si el parámetro cuya incertidumbre se quiere evaluar está definido de forma ambigua el planteamiento inicial de la evaluación será incorrecto.
3. *Presencia de hipótesis no especificadas.* Si el experto no especifica o no es consciente de las suposiciones que fundamentan sus evaluaciones no se podrá poner de relieve la naturaleza condicional de las mismas, con el consiguiente falseamiento de la evaluación.
4. *Presencia de sesgos.* Como se ha visto en el capítulo anterior los sesgos pueden ser de dos clases, motivacionales, cuando las afirmaciones del asesor y sus creencias conscientes son inconsistentes, y cognoscitivos, cuando las creencias conscientes del asesor no reflejan o tienen en cuenta toda la información disponible.
5. *Falta de concreción.* Si el asesor es indiferente o impreciso acerca de un rango de valores en general su evaluación carecerá de valor.

De este modo, se comprende fácilmente la importancia que tiene el que el proceso mediante el cual se extrae la información de los expertos contemple una serie de medidas para evitar, o al menos mitigar en la medida de lo posible, la presencia de los problemas indicados, de modo que la evaluación del experto refleje sus conocimientos conscientes cuando ha considerado correctamente toda la información disponible. Precisamente se entiende por proceso formal de objetivación del juicio de expertos aquel en que un analista intenta:

1. Entrenar al experto en la cuantificación coherente de probabilidades.
2. Identificar y minimizar los sesgos del experto.

3. Definir y documentar sin ambigüedad el tema a evaluar.
4. Poner a disposición del experto toda la información disponible y relevante.
5. Obtener la opinión del experto utilizando las técnicas de evaluación de probabilidades que mejor se adapten al modo de pensar del experto en condiciones de incertidumbre.
6. Comprobar y documentar la racionalidad y coherencia del experto en la evaluación de la incertidumbre.
7. Realizar una verificación final, repitiendo el proceso si es necesario.

Se puede apreciar que en los procesos formales el analista juega un papel esencial, ya que intenta comprender qué información utiliza el experto y cómo la utiliza, de modo que puede inferir los problemas y sesgos que es probable que se estén presentando y tomar las medidas correspondientes para minimizar sus efectos.

En la mayor parte de los protocolos existe una fase en que los expertos en normativa en reunión con cada experto en el tema estudiado solicita del experto sus juicios en forma de probabilidades. El fruto de esta reunión será en bastantes casos, sin modificación posterior, la solución que el experto aporte al problema planteado. Dado que siempre va a tener que proporcionar sus opiniones en términos de probabilidades, es importante poder ofrecerle una variada gama de modos de plasmar así sus opiniones. Se han realizado bastantes investigaciones con el objetivo de identificar técnicas para poder plasmar diferentes modos de percibir y transmitir el concepto de probabilidad, y se ha llegado a poder determinar un conjunto de ellas aceptadas como útiles y utilizadas alternativamente por expertos en normativa de probada experiencia y capacidad.

En este capítulo se mostrarán en detalle las técnicas y protocolos que se pueden utilizar para obtener juicios de expertos, tanto para asignar probabilidades a sucesos como para asignar distribuciones de probabilidad. Se comenzará por las técnicas, para pasar después a los protocolos.

IV.1. Técnicas para asignación de probabilidades y funciones de distribución

En este apartado se va a dar una panorámica de las diferentes técnicas disponibles para facilitar a los expertos proporcionar sus opiniones en términos de probabilidades para sucesos y para parámetros inciertos, tanto en caso univariante como multivariante. Además, se comentará la utilidad que pueden llegar a tener tanto proporcionar un buen entrenamiento al experto en traducir sus ideas en probabilidades como ayudarle a descomponer el problema para poder analizarlo mejor.

IV.1.1. Técnicas para la asignación de probabilidades a sucesos

Las personas en general no son muy dadas a hacer evaluaciones en términos de probabilidad, salvo estadísticos y jugadores, y sus apreciaciones suelen ser bastante imprecisas, recurriendo a términos como muy probable, bastante probable y otros por el estilo. Sin embargo, cuando se pretende atribuir una probabilidad a un suceso se busca una mayor precisión en los juicios; en ocasiones se va a pedir al experto que atribuya probabilidades a sucesos altamente improbables, es decir, que sea capaz de establecer y diferenciar entre valores de probabilidad muy próximos a 0, como 10^{-4} y 10^{-5} . En este caso puede ocurrir que el experto no se sienta capaz de expresar sus opiniones directamente en una escala entre 0 y 1, por lo que se han desarrollado algunas técnicas para ayudarle a transformar en algo cuantitativo su apreciación cualitativa. Estas técnicas se pueden clasificar en *directas* e *indirectas*. Las técnicas directas amplían la escala sobre la que se evalúan las probabilidades para adecuarse a la capacidad del experto. Por su parte la técnicas indirectas se sirven de las preferencias del experto entre dos alternativas para deducir sus probabilidades y se pueden utilizar con aquellas personas a las que les resulte difícil manejar el concepto de probabilidad.

IV.1.1.1. Técnicas directas

Cuando el experto no se siente cómodo con la escala habitual de probabilidad se puede recurrir a otras escalas alternativas, que pueden ser los *odds* o los *log-odds*. Si a un suceso se le asigna probabilidad P , los *odds* y los *log-odds* equivalentes son:

$$odd = \frac{P}{1-P}, \quad \log-odd = \text{Log}\left(\frac{P}{1-P}\right), \quad (28)$$

es decir, el odd es el cociente entre la probabilidad del suceso y la de su complementario y el log-odd es el logaritmo decimal del odd. En las figuras 4.1 y 4.2 se aprecia que la escala de los odds va desde 0 hasta $+\infty$, mientras que la de los log-odds desde $-\infty$ hasta $+\infty$.

Algunos expertos pueden sentirse más inclinados a utilizar el lenguaje de los jugadores. Ellos expresan el concepto de probabilidad mediante expresiones como “h contra k a favor de” o “k contra h en contra de”. Partiendo de esto, se pueden establecer dos igualdades:

$$P = \frac{h}{h+k}, \quad odd = \frac{h}{k}, \quad (29)$$

donde se ve que el paso de la terminología de jugadores a la de probabilidades es inmediata. Para muchas personas, sobre todo si están familiarizadas con el juego, puede ser más fácil establecer una probabilidad extrema como 10^{-3} en términos de “aproximadamente 1 contra 1.000 a favor del suceso”.

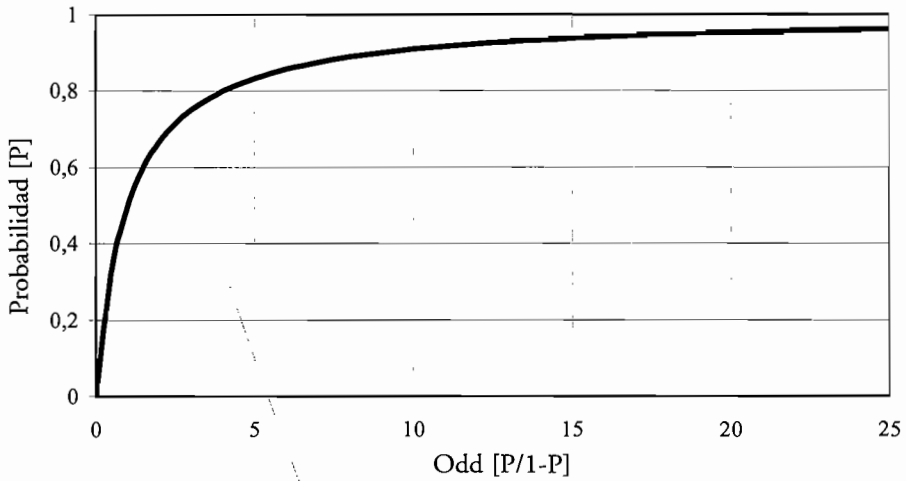


Figura 4. 1. Relación entre la escala de probabilidades y de odds.

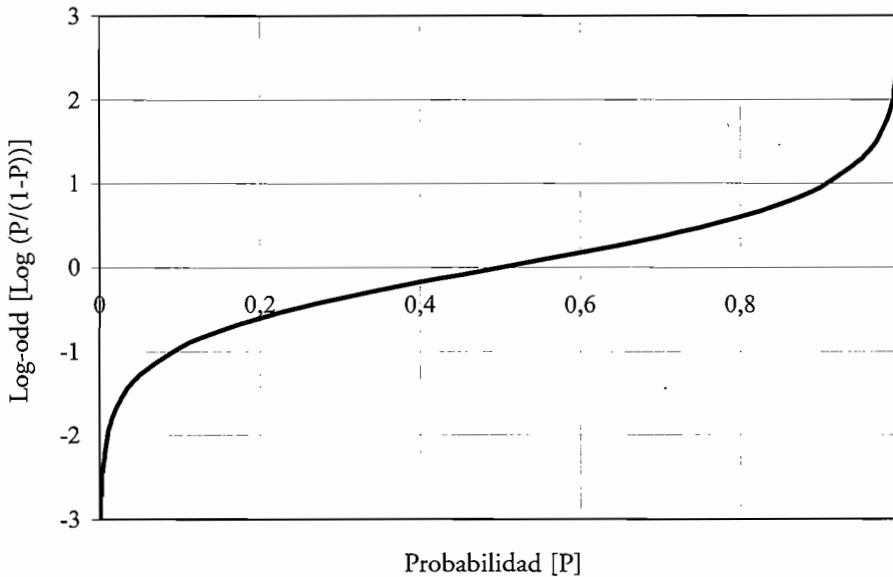


Figura 4. 2. Relación entre la escala de probabilidades y de log-odds.

La utilización de odds y log-odds supone una ampliación de la escala sobre la que se evalúa, lo que debería aumentar la resolución del experto. Cuando se utiliza la escala de 0 a 1 es difícil estimar probabilidades del tipo 0.37 ó 0.83, siendo lo normal utilizar números redondos tales como 0.40 ó 0.85. Este aumento de resolución también puede reducir tanto la tendencia a la sobreconfianza como a la subconfianza, aunque algunos estudios experimentales no han encontrado diferencias significativas en evaluaciones con probabilidades y odds. Dadas estas circunstancias el criterio más importante a seguir para seleccionar una técnica directa de evaluación de probabilidades es su adecuación a la capacidad y preferencias del experto.

IV.1.1.2. Técnicas indirectas

Según Savage ^[60] los métodos directos presentan gran error de medida (discrepancia entre el valor evaluado y el valor real que cree la persona) porque la mayor parte de los sujetos no poseen buenas intuiciones sobre la probabilidad. Por eso propone la utilización de métodos indirectos en los que se evita la mención explícita de la probabilidad. En concreto él propone la técnica de la *certeza equivalente*. En esta técnica se propone al experto un juego en el que gana un premio económico si el suceso sobre el que se le pregunta acaece y en el que no recibe nada en caso contrario; después se le pregunta hasta qué cantidad de dinero sería capaz de pagar por poder participar en el juego. La probabilidad del suceso es el cociente entre esa cantidad máxima que estaría dispuesto a pagar y el premio (ésta es la misma interpretación sugerida en el capítulo sobre el marco teórico como más intuitiva). Otro modo equivalente a éste es plantear al experto la elección siguiente: ganar un premio, digamos y pesetas, si el suceso ocurre y nada si no ocurre, frente a ganar seguro, ocurra o no el suceso, una cantidad $x \in [0, y]$. Se varía x hasta que al experto le resulta indiferente escoger una u otra opción. La probabilidad asignada será la solución de la ecuación $x = P \cdot y + (1 - P) \cdot 0$, es decir, $P = x / y$.

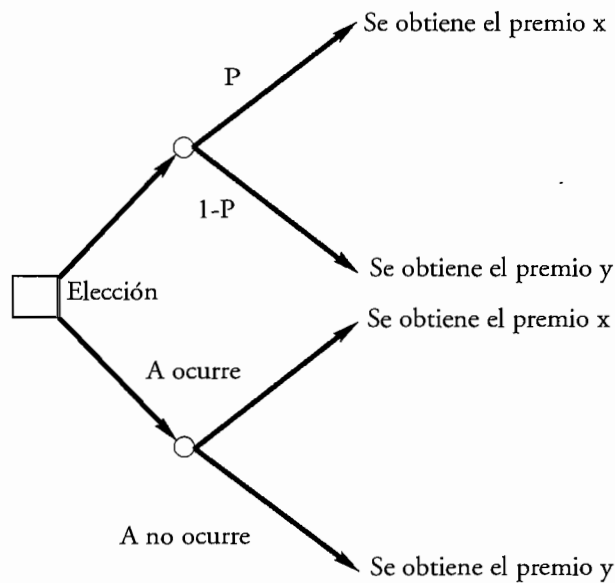


Figura 4. 3. Lotería de referencia de De Finetti ^[49]

De Finetti ^[64] no es partidario de estos planteamientos ya que estima que transmiten a las probabilidades así evaluadas las actitudes del experto frente al juego. Para evitar esto plantea el uso de una técnica denominada *lotería de referencia*. En ella se le propone al experto dos loterías: en la primera recibe un premio x con probabilidad P y otro menor, y , con probabilidad $1 - P$. En la segunda se recibe x si el suceso A ocurre e y si no ocurre (véase la figura 4.3). Se le pide que elija una de las dos loterías. P se va variando hasta que el experto quede indiferente ante ambas loterías, en cuyo caso ese valor de P es el que atribuye a la probabilidad de acaecimiento del suceso A . El hecho de que el premio sea igual en ambos casos se supone que elimina las actitudes no neutrales frente al juego.

Otra técnica debida a Raiffa que intenta eludir el inconveniente de las actitudes hacia el juego del experto es la llamada *urna de referencia*, en la que se anima al experto a que imagine una urna que contiene bolas de dos colores, uno correspondiente al acaecimiento y otro al no acaecimiento del suceso, y que decida qué proporción entre ambos colores es equivalente a sus apreciaciones sobre la ocurrencia o no del suceso. A pesar del interés que presentan esta técnica y la lotería de referencia para utilizarlas con expertos con pocos conocimientos de probabilidad, muchos analistas las encuentran tediosas y son partidarios de hacer uso de ellas sólo cuando se van a evaluar pocos sucesos o bien durante las primeras etapas de un proceso formal de objetivación para explicar al experto que lo necesite un modo intuitivo de razonamiento probabilista.

Una última técnica indirecta que ayuda a visualizar intuitivamente la probabilidad y que sin embargo es más fácil de utilizar que las anteriores es la *rueda de probabilidad* ^[74]. Esta consiste en dos cartulinas circulares de distinto color y concéntricas, una detrás de otra y cada una de ellas con un corte radial, de modo que al girar una y fijar la otra se puede solapar un sector de la posterior con uno de la anterior. Girando la cartulina móvil el tamaño del sector solapado cambia. En la parte posterior de la cartulina anterior hay una escala que mide la fracción de área solapada. Atravesando el centro de las cartulinas, y perpendicular a ellas, se dispone de un eje en torno al cual una aguja puede girar libremente, de modo que si se hace girar se parará poco después encima de alguno de los dos sectores, el solapado o el no solapado. Para preguntar por la probabilidad de un suceso se pregunta al experto si prefiere recibir un premio como resultado de hacer girar la aguja y que se detenga en el sector solapado o como resultado de que el suceso ocurra. Cuando el experto se muestra indiferente sobre ambas opciones se mira en la escala la fracción de superficie solapada, que será la probabilidad de acaecimiento del suceso que se evalúa.

IV.1.2. Técnicas para la asignación de distribuciones a parámetros inciertos

Las técnicas para la construcción de distribuciones se dividen en métodos para distribuciones discretas y continuas. Las técnicas más utilizadas para las distribuciones continuas se basan en la evaluación de sucesos discretos tales como la probabilidad de que una magnitud sea menor o igual

que un cierto valor y en la posterior interpolación de la función de distribución. A pesar de esta similitud formal entre ambos tipos de métodos puede ocurrir que la percepción psicológica de la tarea por parte del experto sea diferente, por lo que no conviene extrapolar los procedimientos de unos métodos sobre los otros.

IV.1.2.1. Distribuciones discretas

En el caso general se tendrán n sucesos mutuamente excluyentes o n posibles valores de la variable aleatoria discreta a los que habrá que asignar probabilidades. Cuando n es muy grande (por ejemplo 10 o más) suele ser conveniente reconsiderar el espacio de los sucesos mediante el agrupamiento o también intentando identificar la variable continua que puede corresponder a los sucesos. El primer paso para aproximarse al problema es solicitar al experto que ordene de mayor a menor verosimilitud los sucesos o valores y que explique detalladamente sus razones. Después se comienzan a evaluar las probabilidades. Lo usual es preguntar por las probabilidades o los odds de los sucesos directamente, del más verosímil al menos verosímil. En caso de que el experto no se sienta capacitado para responder se puede recurrir a alguna de las técnicas de ayuda mostradas en el apartado anterior.

La condición de normalización a 1 hace necesario evaluar sólo $n-1$ probabilidades. Sin embargo, es recomendable evaluar las n probabilidades para comprender de forma completa el razonamiento del experto y comprobar al final la condición de normalización. Si no se cumple es necesario normalizar la evaluación, aunque en ocasiones puede ser recomendable preguntarse sobre las causas de tal inconsistencia. La constante k de normalización se obtiene de la ecuación $k \left(\sum_{i=1}^{i=n} p_i \right) = 1$.

Lindley, Tversky y Brown ^[80] han propuesto otro método de normalización basado en la inferencia bayesiana. Supóngase que se considera el suceso A sobre el cual el experto evalúa la distribución incoherente $\{q, \bar{q}\}$, es decir $q + \bar{q} \neq 1$, a pesar de que posee una distribución “verdadera” coherente $\{\pi, \bar{\pi}\}$. Si el analista posee una distribución *a priori* $P(\pi)$ para la probabilidad de los valores de π , entonces la fórmula de Bayes permite incorporar la evidencia q para obtener la distribución *a posteriori*:

$$P(\pi/q) \propto P(q/\pi) \cdot P(\pi), \quad (30)$$

La verosimilitud $P(q/\pi)$ refleja la opinión del analista sobre los conocimientos en normativa del experto, mientras que $P(\pi)$ se puede calcular como $P(\pi/A) \cdot p_A + P(\pi/\bar{A}) \cdot p_{\bar{A}}$, donde $\{p_A, p_{\bar{A}}\}$ es la distribución que asigna el analista a los sucesos A y \bar{A} y $P(\pi/A)$ y $P(\pi/\bar{A})$ expresan su opinión sobre los conocimientos del experto en el tema estudiado. El valor de π , la verdadera opinión del experto, se puede estimar como la esperanza matemática de la distribución $P(\pi/q)$,

$$\hat{\pi} = E(\pi / q). \quad (31)$$

Para una distribución incoherente $\bar{q} = \{q_1, \dots, q_n\}$ correspondiente a una partición $\{A_i\}_{i=1, \dots, n}$ de sucesos, este procedimiento implica cálculos complicados, por lo que no resulta útil para las necesidades prácticas. Los mismos autores proponen una simplificación consistente en suponer que cada elemento q_i de \bar{q} se distribuye normalmente en torno a π_i , el correspondiente elemento de $\bar{\pi} = \{\pi_1, \dots, \pi_n\}$, con varianza σ^2 y que estas distribuciones son independientes entre sí. Si la opinión *a priori* del analista es no informativa, $P(\bar{\pi}) = 1$, la distribución *a posteriori* depende de la verosimilitud. En concreto la fórmula de Bayes queda de la forma:

$$P(\pi / \bar{q}) = \frac{P(\bar{q} / \pi) \cdot P(\bar{\pi})}{\int_0^1 \dots \int_0^1 P(\bar{q} / \pi) \cdot P(\bar{\pi}) \cdot d\pi_1 \dots d\pi_n} = k \cdot \exp \left\{ \frac{-1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (q_i - \pi_i)^2 \right\}, \quad (32)$$

La estimación por el método de máxima verosimilitud de cada π_i consiste en minimizar la expresión $\sum_{i=1}^n (q_i - \pi_i)^2$ sometida a la restricción $\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$. Estas estimaciones y sus precisiones asociadas son:

$$\hat{\pi}_i = q_i + n^{-1} \left(- \sum_{i=1}^n q_i \right), \quad \text{var}(\hat{\pi}_i) = (1 - n^{-1}) \sigma^2, \quad (33)$$

donde se aprecia que la mejora de precisión debida a la coherencia sólo es apreciable cuando n es pequeño.

IV.1.2.2. Distribuciones continuas

Existen dos técnicas fundamentales para construir las funciones de distribución de variables aleatorias continuas: la técnica de los *cuantiles* y la de los *intervalos*. La primera de ellas está basada en fijar probabilidades y evaluar los valores correspondientes de la variable y la segunda en fijar estos valores y evaluar sus probabilidades. En ocasiones ambas se combinan. Junto a éstas existe otro grupo de técnicas que requieren unos conocimientos de estadística superiores a lo común y que según algunos autores no siempre son bien comprendidas.

IV.1.2.2.1. Técnica de los cuantiles

Dada una variable aleatoria x , con función de distribución $F(x)$, se define el *cuantil* q de la variable como el valor x_q tal que x toma valores menores o iguales que x_q con probabilidad q , es decir, $F(x_q) = q$. Si q se multiplica por cien x_q se puede dar también como el *percentil* 100 q %. Está claro que el cuantil 0 es la cota inferior del parámetro incierto, el cuantil 1 la cota superior y el cuantil 0.5 la mediana. La función de distribución de la variable aleatoria no es sino representar q frente a x_q .

La aplicación de la técnica comienza por preguntar al experto por las cotas superior e inferior del parámetro. Si no hay certidumbre acerca de esos valores puede comenzarse por preguntar por los cuantiles 0.01 y 0.99 ó 0.05 y 0.95 dependiendo de lo preciso que se considere el experto. En este momento es conveniente hacer preguntas de confirmación con el fin de contrarrestar la sobreconfianza. Las preguntas pueden estar encaminadas a que el experto imagine situaciones en que el parámetro pudiera salirse de las cotas dadas y la verosimilitud de tal hipótesis. Si el analista conoce alguno de esos casos tiene que plantearse al experto para darle la opción de ampliar los rangos en función de la nueva información. Einhorn y Hogarth ^[71] aseguran que los expertos suelen hacer buen uso de este tipo de información. En general, hacer pensar al experto sobre esas situaciones suele llevarlo a ampliar dichos rangos.

Una vez acotada la variable o determinados sus cuantiles extremos se pasa a determinar la mediana, preguntando al experto cuál cree que es el valor tal que la variable aleatoria será superior a él con probabilidad 0.5 e inferior a él con igual probabilidad. Se debe comprobar que la respuesta no está muy próxima al punto medio del rango definido por los extremos, lo que puede sugerir que el experto está haciendo una simple media, ni que tampoco se sitúa muy cerca de uno de esos extremos, ya que esto puede suponer una pobre definición del rango evaluado inicialmente o bien que la escala de medida de la variable no es adecuada. Posteriormente se pasa a determinar los cuantiles 0.25 y 0.75 con preguntas similares. Si se desea se puede determinar otro par de cuantiles, pero en general con cinco ya se puede trazar una curva aproximada de la función de distribución que se debe discutir con el experto para detectar posibles inconsistencias. También es muy útil determinar la función de densidad y mostrársela al experto, ya que con ella se observa muy claramente la simetría o asimetría de la evaluación.

Es importante comenzar la aplicación de la técnica por la determinación de los cuantiles extremos. En las primeras aplicaciones se hizo popular el método llamado de la *bisección*, que comienza por determinar la mediana de la distribución y posteriormente las medianas de los rangos que van apareciendo. Actualmente este método no se utiliza, ya que está comprobado experimentalmente que suele conducir a un serio sesgo de anclaje y por lo tanto a una gran sobreconfianza.

IV.1.2.2.2. Técnica de los intervalos

Para aplicar esta técnica el analista selecciona una serie de valores que podría tomar el parámetro y pide al experto que evalúe las probabilidades de que el parámetro esté dentro de los intervalos definidos a partir de dichos puntos. Se consideran dos versiones, la de *intervalos abiertos* y la de *intervalos cerrados*. En la primera se selecciona un punto y se pide al experto que evalúe la probabilidad de que el parámetro esté dentro del intervalo abierto inferior (o superior) definido. En la otra versión se seleccionan dos puntos y se pide al experto que dé la probabilidad de que el

parámetro esté dentro del intervalo cerrado definido. En el caso de que no se sienta capaz de dar probabilidades directamente se puede recurrir de nuevo a las ayudas comentadas en el apartado IV.1.1.2. Para ello basta considerar como sucesos los intervalos construidos.

En ambas versiones y para evitar el sesgo de anclaje el analista comienza delimitando valores extremos, que se corresponden con los cuantiles 0.01 y 0.99 ó 0.05 y 0.95. Después selecciona varios puntos interiores (normalmente de tres a siete) y pregunta al experto en función de la versión que se utilice. Cada respuesta debe ser razonada y en general se le debe enfrentar a datos conflictivos o hipotéticas situaciones no consideradas previamente para reducir la sobreconfianza. Además, en la técnica de los intervalos cerrados es conveniente presentar al experto los intervalos seleccionados antes de la evaluación y pedirle que los ordene de mayor a menor verosimilitud. Con los datos obtenidos se construyen las funciones de distribución y densidad y se inicia una discusión con el fin de verificar la consistencia de las opiniones del experto.

IV.1.2.2.3. Otras técnicas

Desde el punto de vista estadístico el proceso más sencillo para caracterizar la incertidumbre de un parámetro es solicitar al experto que dibuje directamente la *función de densidad* o la *función de distribución*. Para ello hay que proporcionarle papel milimetrado o un programa gráfico de ordenador con el que pueda realizar la tarea. Posteriormente el experto debe dar algunos valores para definir numéricamente la curva. Cada una de estas representaciones de la incertidumbre tiene sus ventajas. La función de distribución es fácil de evaluar por lo sencillo de su interpretación, permitiendo ver claramente los valores de los cuantiles de interés. Por su parte, como ya se ha comentado, la función de densidad permite apreciar mejor fenómenos de simetría o asimetría y la ubicación de la moda, así como la ubicación relativa de la media y la mediana respecto a la moda. El ajuste directo de las curvas puede ser útil cuando el experto puede elaborar, en base a la información de la que dispone, juicios cualitativos sobre la variabilidad del parámetro, tales como que la probabilidad de los valores individuales deberían disminuir suavemente a ambos lados del máximo, que la mayor parte de la probabilidad debería estar concentrada en un cierto rango de valores o que la probabilidad de las colas (valores extremos) debe ser baja.

Otro modo de suministrar las funciones de densidad y distribución, si el experto se siente capaz, es determinar la *forma teórica* de la ley de probabilidades (gaussiana, exponencial, etc.) y dar los valores de los parámetros que la caracterizan. Sin embargo raramente se cuenta con expertos con amplios conocimientos en normativa que les permitan llevar a cabo la tarea sin ninguna dificultad. Winkler ^[72] ha diseñado dos técnicas denominadas *muestra a priori equivalente* (EPS - equivalent prior sample) y *muestra futura hipotética* (HFS - hypothetical future sample) para evaluar los parámetros de una distribución beta a partir de la opinión de los expertos sobre la proporción de una

determinada clase en una población. El mismo autor reconoce la dificultad que los expertos encuentran para aprender a utilizar dichas técnicas. Sin embargo la versatilidad de estas distribuciones podría hacer aconsejable en ocasiones el uso de estas técnicas si se cuenta con expertos con los suficientes conocimientos estadísticos.

Smith ^[79] sugiere un modo indirecto de construir la función de densidad de probabilidad denominado *clasificación psicométrica*. Este método consiste en dividir el posible rango de valores que puede tomar el parámetro en varios segmentos, digamos n , y pedir al experto que los clasifique de más a menos probable. Después se le pide que clasifique de mayor a menor las diferencias en probabilidad entre los diferentes intervalos. Obsérvese que sólo se ordena, no se evalúan las probabilidades de los n intervalos ni las $n-1$ diferencias. Con estos datos y mediante un procedimiento sugerido por Kendall ^[79] para cuantificar las clasificaciones se obtienen primero probabilidades relativas entre intervalos y de éstas se pasa a probabilidades absolutas, con las que se genera un histograma. El paso de éste a una función de densidad de probabilidad es directo. Los resultados experimentales confirman la precisión y fiabilidad del método, produciendo, en general, distribuciones más dispersas que otras técnicas. Sin embargo, Morgan y Henrion ^[49] opinan que esto se debe más al proceso de tratamiento de datos que hace el método que a las propias evaluaciones de los expertos ya que, según ellos, el procedimiento lleva implícito un recalibrado de la opinión del experto. Hampton y colaboradores ^[79] consideran las ordenaciones en que se basa el método, especialmente la segunda, sin significado intuitivo ni psicológico, siendo difíciles de evaluar por el experto.

IV.1.2.2.4. Selección de la técnica

Los resultados de los estudios que se han dedicado a la comparación de las distintas técnicas de evaluación de distribuciones continuas no aportan claridad al tema a pesar de ser muy numerosos. Por lo tanto la elección de la técnica debería depender de la naturaleza de la tarea y de la experiencia y preferencias del experto. Pero, aunque las técnicas adicionales que se han comentado en último lugar pueden ser de utilidad en ciertos casos, no debe perderse de vista que en general es difícil explicárselas a personas no habituadas al razonamiento matemático. Por ello, las técnicas más utilizadas con diferencia son la de los cuantiles y la de los intervalos, tanto por razones de comprensibilidad como de facilidad de aplicación.

Existe cierta evidencia experimental de que la técnica de los intervalos da lugar a distribuciones más difusas y normalmente mejor calibradas que la de los cuantiles. Por ello una práctica recomendable es mezclar las dos técnicas para comprobar la consistencia de los juicios que se están dando. Así, a partir de juicios dados mediante una de las técnicas se pueden construir preguntas en la otra técnica y comprobar si hay diferencias o no en las respuestas. Por ejemplo si se aplica la

técnica de los cuantiles y se han calculado ya los cuantiles 0.25, 0.5 y 0.75, los cuatro intervalos definidos por esos tres puntos tendrían que ser considerados igualmente verosímiles por el experto, ya que en caso contrario se estaría comportando de forma inconsistente.

IV.1.3. Distribuciones multivariantes

Dados los resultados experimentales comentados en el capítulo anterior sobre la capacidad cognitiva del ser humano no debe sorprender el hecho de que en general las personas posean una capacidad muy limitada para detectar estructuras de correlación, por lo cual la tarea de evaluar distribuciones de probabilidad multivariantes es prácticamente inabordable de forma directa, siendo necesario recurrir a técnicas y ayudas que simplifiquen la labor.

En el caso de dos variables discretas que pueden tomar los valores x_1, \dots, x_n e y_1, \dots, y_m y se puede estimar su distribución conjunta evaluando la distribución marginal de una de ellas, $P(x_i)$, y n distribuciones condicionadas $P(y_j/x_i)$, y teniendo en cuenta que $P(x_i, y_j) = P(x_i) \cdot P(y_j/x_i)$. Estas evaluaciones se realizan con la técnica comentada en IV.1.2.1. Si x e y poseen una relación causa-efecto, por ejemplo x es causa e y es efecto, es conveniente evaluar la distribución condicionada $P(y/x)$ (inferencia causal) en lugar de $P(y/x)$ (inferencia diagnóstica) porque se adecúa mejor al modo de pensamiento intuitivo de las personas. Sin embargo en muchas ocasiones lo que primero se conoce es el efecto y después la causa, por lo que los datos permitirán hacer una inferencia diagnóstica y $P(y/x)$ se obtendrá mediante la fórmula de Bayes. En este punto se debe prevenir al experto sobre la confusión del inverso comentada en el capítulo anterior. En casos más complejos con distintas variables relacionadas es fundamental que el experto comprenda claramente la tarea, para lo cual existe el formalismo de los *diagramas de influencia* ^[81], que ayuda a modelar las dependencias lógicas y estadísticas entre variables aleatorias.

Un diagrama de influencia es una representación gráfica de las relaciones entre magnitudes aleatorias que son importantes en un problema (véase la figura 4.4). Las variables se representan por círculos llamados *nodos* y las relaciones entre ellas mediante arcos que unen los nodos. A cada nodo se le asocia una probabilidad condicional. Esta condicionalidad es con respecto a la variable del nodo inmediatamente anterior y la relación anterior-posterior entre nodos se indica mediante puntas de flecha en los arcos.

En (a) z es la variable anterior de x e y , y por lo tanto estas dos variables son condicionalmente dependientes de z y *condicionalmente independientes* entre sí. La independencia condicional supone que $P(x/z)$ y $P(y/z)$ son independientes, pero no implica que $P(x)$ y $P(y)$ también lo sean. La independencia condicional se indica mediante la no existencia de flecha que conecte ambos nodos. En (b) x e y son *incondicionalmente independientes* y z es condicionalmente dependiente de

ambas. Nodos a los que no llegan flechas son siempre incondicionalmente independientes. En (a) $P(x, y, z)$ se puede expresar como $P(z)P(x/z)P(y/z)$ y en (b) como $P(x)P(y)P(z/x, y)$. La teoría de los diagramas de influencia está muy elaborada y existen teoremas que permiten simplificar el cálculo de probabilidades para el caso de diagramas complejos.

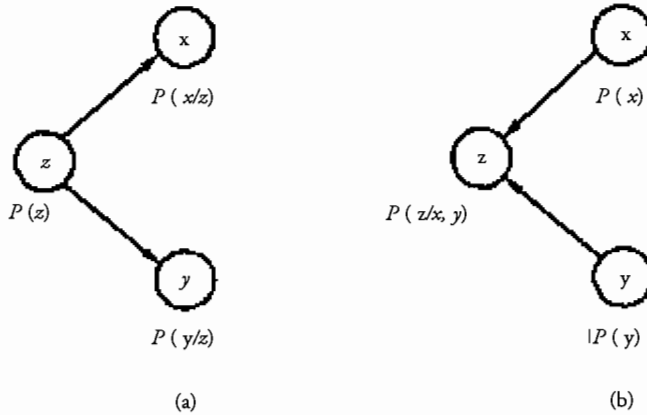


Figura 4.4. Ejemplos de diagramas de influencia.

El cálculo de distribuciones continuas multivariantes puede llevarse a cabo mediante la discretización de los rangos de las variables y utilizando los procedimientos comentados. Kadane y colaboradores ^[82] han desarrollado un procedimiento de evaluación asistido por ordenador para las normales n -dimensionales que se basa en la técnica de los cuantiles. Asimismo Chaloner y Duncan ^[83] han propuesto un modelo de evaluación para las distribuciones multinomiales. Según Morgan y Henrion ^[49] es difícil que los expertos posean la habilidad cognitiva necesaria para llevar a cabo la labor y por lo tanto no creen que estos métodos sean operacionales. Algunas veces se está interesado en establecer la dependencia lineal entre las variables continuas a través de su *correlación*. Gokhale y Press ^[84] han propuesto dos métodos para evaluar una distribución *a priori* para el coeficiente de correlación de una normal bivalente, basándose en la probabilidad de “concordancia” y de “superación”, y según un estudio experimental de los autores realizado con personas con buenos conocimientos estadísticos los resultados son adecuados.

IV.1.4. Ayudas a la obtención del Juicio de Expertos

Como se ha visto en el punto anterior cuando se evalúa una distribución de probabilidad siempre hay que pedir al experto que aporte razones y elabore de forma cuidadosa argumentos que justifiquen sus juicios, procurando que considere adecuadamente la información conflictiva, ya que es el único modo de contrarrestar la sobreconfianza y asegurar la calidad en la evaluación. Además, ciertas características de la tarea pueden hacer aconsejable el uso de una estrategia denominada *descomposición* para mejorar la comprensión del problema por parte del experto, y el *entrenamiento en*

técnicas de evaluación previo a la evaluación puede ser beneficioso para la mejora de su comportamiento. En general estas dos prácticas pueden dar más consistencia y calidad a las evaluaciones de los expertos.

IV.1.4.1. Descomposición

Esta estrategia para abordar un problema de cuantificación supone desagregar la magnitud de interés en otras más sencillas de evaluar y componer posteriormente las probabilidades de éstas para obtener la probabilidad de la magnitud que interesa. Por ejemplo, si se quiere estimar el número de vacas de un país se puede calcular como $(\text{habitantes del país})(\text{consumo per capita anual de leche})(\text{producción media de leche por vaca})^{-1}$, datos estos que pueden ser más fáciles de encontrar. Los juicios así elaborados pueden representar más adecuadamente el verdadero estado de conocimiento del problema, ya que las evaluaciones más simples son más precisas y por lo tanto están mejor calibradas. Pero aunque la idoneidad de esta técnica para mejorar la calidad de la evaluación se puede apoyar claramente en argumentos generales de tipo psicológico y cognitivo, en realidad todavía faltan evidencias experimentales definitivas sobre las circunstancias en las cuales es más efectiva y el nivel óptimo de descomposición. A pesar de esto la descomposición es ampliamente utilizada por los analistas y ha llegado a ser una cuestión de rutina.

Apostolakis y colaboradores ^[85] indican, tras una revisión de distintos trabajos en los que se utilizó el juicio de expertos, que en ocasiones se hace uso de la descomposición de forma tosca o en situaciones en las que no tiene sentido. Estos autores apuntan tres escenarios en los cuales la descomposición puede ser efectiva:

1. Cuando existe mucha incertidumbre.
2. Cuando existe una teoría relevante para algunos aspectos del problema.
3. Cuando existen varios expertos que poseen información sobre diferentes aspectos del problema.

En cuanto al nivel óptimo de descomposición Bonano y colaboradores ^[7] señalan que siempre se llega a un punto tal que más allá de él la calidad de la evaluación se resiente, por lo que el nivel óptimo es aquel en que existe un equilibrio entre el número de evaluaciones que se deben hacer, la dificultad de las mismas y la complejidad numérica de la agregación. Este nivel óptimo lo determina el analista intentando además que las variables desagregadas sean conocidas por el experto. Apostolakis y colaboradores ^[85] opinan que otra aproximación que puede ser muy útil es la desagregación realizada por el propio experto, ya que permite conocer sus creencias y mejorar su satisfacción con el proceso de evaluación en general.

Para realizar la agregación numérica de las variables evaluadas hay que conocer la relación funcional que existe entre ellas y la variable de interés: $y = f(\bar{x})$. Si f es sencilla la propagación de incertidumbres podrá hacerse analíticamente; en caso contrario habrá que recurrir a la simulación por muestreo, lo cual no es problema.

IV.1.4.2. Entrenamiento en técnicas de evaluación

Se ha observado que en general en las evaluaciones subjetivas existe una tendencia muy marcada hacia la sobreconfianza, independientemente de la técnica que se utilice. Morgan y Henrion ^[49] revisaron un gran número de estudios experimentales que implicaban la evaluación de distribuciones continuas y sus correspondientes curvas de calibración y encontraron que el índice intercuartílico oscilaba entre el 20% y el 40% y el índice de sorpresas entre el 5% y el 40%, cuando los valores óptimos de estos parámetros son 50% y 2% respectivamente para un asesor bien calibrado. Esto ha llevado a pensar que un entrenamiento previo en las técnicas de evaluación puede reducir la sobreconfianza y generar juicios más precisos, ya que se somete al experto a un proceso de *realimentación* con el que comprende mejor la técnica y a su vez puede depurar el mecanismo inferencial mediante el cual elabora sus juicios. De hecho la psicología del conocimiento ha establecido que el ser humano es un organismo adaptativo, de modo que la naturaleza de la tarea sobre la cual tiene que elaborar juicios determina en gran medida las estrategias que utiliza ^[70]. Un buen ejemplo de esto son los meteorólogos encargados de la predicción del tiempo, que están excelentemente calibrados debido a que deben realizar su labor diariamente.

La realimentación intenta corregir el comportamiento del experto mostrándole la calidad de sus juicios en evaluaciones sucesivas. Esto se puede realizar con curvas de calibración o con reglas de puntuación. Además es conveniente que después de cada evaluación se entable una charla entre el analista y el experto para discutir las posibles dificultades. Sin embargo, y dado que las evidencias experimentales son dispersas y nada concluyentes, no existe ningún criterio acerca de cuáles deben ser las características de un buen programa de entrenamiento. Las cuestiones más formales que se tienen que decidir se refieren a la elección entre curvas de calibrado o reglas de puntuación (en este último caso hay que seleccionar alguna regla en concreto) y el número de evaluaciones de entrenamiento necesarias. Otros inconvenientes del entrenamiento son que consume mucho tiempo, corriendo el riesgo de que el experto se canse, y que existe gran dificultad en elaborar tareas de entrenamiento con características apropiadas. Según Apostolakis y colaboradores ^[85] esta técnica puede ser útil en ciertos casos específicos, por ejemplo cuando existe poca o ninguna evidencia estadística sobre el tema o cuando los expertos manifiestan su incomodidad a la hora de cuantificar en forma de probabilidad sus juicios.

IV.2. Protocolos de Juicio de Expertos

El conocimiento de los mecanismos inferenciales que utiliza el ser humano para elaborar sus juicios es todavía muy incompleto. Por ello, y a pesar de que se han identificado algunas técnicas útiles, muchos aspectos particulares del diseño de un protocolo de objetivación son todavía cuestión de gusto y sentido común. No obstante existen ciertas características generales, avaladas por la experiencia, que se deberían implementar en cualquier protocolo, independientemente del uso particular que se le vaya a dar y de los expertos que participen en él. Con el fin de apreciar algunas de las aproximaciones llevadas a cabo hasta la fecha se comentarán tres protocolos que se han aplicado en diferentes contextos. Los dos primeros, el del Stanford Research Institute y el de Morgan y colaboradores, están diseñados para la evaluación de distribuciones de probabilidad, mientras que el de Sandia National Laboratories se puede amoldar a otros tipos de incertidumbres.

IV.2.1. El protocolo del Stanford Research Institute

Este fue el primero entre los procedimientos estructurados para realizar objetivación del juicio de expertos y ha ejercido una gran influencia sobre el desarrollo posterior del tema. Fue desarrollado durante los años 60 y 70 por el Grupo de Análisis de Decisión del Instituto de Investigaciones de Stanford (SRI) de la Universidad de Stanford. El protocolo se estructura en cinco fases que constituyen el proceso básico, aunque posteriormente a la disolución del Grupo de Análisis de Decisión esta versión original se revisó y amplió en dos fases para tener en cuenta la agregación de la opinión de varios expertos y la discretización de las distribuciones evaluadas. La información expuesta a continuación se basa en un trabajo de Merkhofer ^[74]. En este protocolo el proceso de objetivación se concibe como la labor común de un experto, especialista en un tema, y un analista experto en normativa.

Fase 1. Motivación

El objetivo de esta fase es establecer contacto con el experto, haciéndole ver qué es lo que se pretende de él, y tratar de averiguar si existe una amenaza seria de sesgo motivacional.

En primer lugar se explica al experto cuál es el problema general en que se inscribe lo que a él se le va a preguntar: se le comenta la importancia que los análisis de sensibilidad atribuyen a la incertidumbre sobre el parámetro en cuestión y se le indica el uso que se hará de la información que suministre. Una vez comprendido esto por el experto, se le hace ver que lo que se pretende evaluar del modo más preciso posible es la incertidumbre sobre el parámetro de interés, no predecir ningún valor particular. Hacer esta distinción es muy importante, sobre todo si durante la charla informal se detectan posibles sesgos de gestor o de experto.

Después de la tarea anterior hay que señalar al experto que tiene que ser un estimador imparcial de la incertidumbre, pasando a indagar sus posibles afiliaciones a empresas o instituciones que sean o puedan ser parte interesada en el problema que se trata. Si se detectan sesgos motivacionales se pueden intentar eliminar cambiando la estructura de incentivos que percibe el experto, reestructurando la tarea o también recurriendo a la técnica de desagregación, todo ello en función del tipo particular de sesgo. Si los sesgos motivacionales no parecen corregibles puede ser aconsejable prescindir del experto, aunque esto ha de hacerse sólo en casos extremos.

Fase 2. Estructuración

El propósito de esta fase es doble. Por una parte se trata de estructurar la magnitud incierta en una o varias variables relacionadas y bien definidas que faciliten la labor de asignar probabilidades; por otra parte se intenta averiguar el modo en que el experto razona sobre la magnitud para poder identificar posibles suposiciones implícitas que puedan falsear la evaluación. Esta fase se desglosa en tres etapas que se comentan a continuación.

La primera etapa de la estructuración consiste en establecer de modo inequívoco, sin posibilidad de ambigüedad, cuál es el parámetro cuya incertidumbre se está evaluando. Una ayuda importante en este paso es la *prueba del clarividente*. Antes de aceptar la definición del parámetro hay que preguntarse si un clarividente podría dar, sin dudas ni matizaciones, el valor del mismo. El valor de la pastilla de UO_2 en el año 2010 no pasaría esta prueba. Habría que indicar el grado de enriquecimiento, el tipo de reactor, el suministrador, la moneda en que se pagaría y el año de referencia, entre otros atributos.

A continuación se estudia la posible utilidad de descomponer el problema en variables más elementales. La desagregación puede ayudar a combatir los sesgos motivacionales, pues pasar a trabajar con variables de más bajo nivel puede inducir una desconexión entre los juicios sobre esas variables y los posibles intereses del experto, asentados sobre variables de más alto nivel. Por otra parte, los autores de este protocolo consideran que la descomposición también puede ser útil para ayudar a evaluar la probabilidad de sucesos compuestos, ya que se puede eliminar la tentación de sustituir una distribución conjunta de sucesos por una condicionada.

Posteriormente se intenta registrar y dejar al descubierto todas las hipótesis que el experto está realizando de modo explícito o implícito a la hora de emitir sus juicios. Una herramienta para descubrir las hipótesis implícitas es preguntarle contra qué posible condicionante le gustaría tomar un seguro, es decir, si se le permitiese asegurarse contra algo que podría hacer que sus opiniones fueran erróneas, ¿cuál sería ese algo? Finalmente hay que seleccionar las unidades en que se van a medir el parámetro de interés u otros de más bajo nivel en que éste se haya desagregado. El criterio que se debe seguir es utilizar las unidades con las que el experto se sienta más cómodo.

Fase 3. Condicionamiento

El propósito de esta fase es que el analista conozca e induzca al experto a tener presentes los datos y argumentos que utilizará el mismo experto para elaborar sus juicios y abordar el problema de los sesgos del conocimiento. Una vez que el experto ha comentado la información y el proceso inferencial que seguirá, el analista debe animarle a que enfoque el problema desde otros posibles puntos de vista.

A la hora de encarar un problema se dispone de dos tipos de información: la información base y la información específica. Si existe información base hay que hacer pensar al experto sobre ello. Si no está teniendo en cuenta esa información general puede ser útil preguntarle cuál sería la opinión de una persona que no hubiera tenido acceso a la información específica, con la vista puesta en utilizar la fórmula de Bayes. En la argumentación que realice el experto también puede aparecer el efecto de basar la predicción en relaciones de poca capacidad predictiva. En este caso es conveniente hacerle notar con el fin de aplicar alguna fórmula correctiva que tenga en cuenta una regresión hacia la media, siempre con el consentimiento del experto. Para este caso Tversky y Kahneman ^[74] proponen un procedimiento que supone dar una *medida de capacidad predictiva*, a saber: $\tau = 2 \cdot \rho - 1$, donde ρ es la estimación (en general subjetiva) del coeficiente de correlación lineal asociado a la relación predictiva. Así, si el experto da una estimación Y , cuando la media de la predicción es μ_y , y se aprecia un coeficiente de correlación ρ , la predicción habría que corregirla hacia el valor $\mu_y + \tau \cdot (Y - \mu_y)$.

Para tratar de aminorar el efecto de los sesgos de disponibilidad y de anclaje y ajuste se sugiere de nuevo hacer pensar al experto, planteándole que lleve el parámetro hasta los valores extremos, de baja pero no nula verosimilitud, y tratar de imaginar escenarios que pudieran dar lugar a esos valores extremos. Otra posibilidad para contrarrestar estos sesgos es comentar su incidencia en la sobreconfianza, e invitarle a realizar algún ejercicio de construcción de curva de calibrado, con la intención de hacerle ver que ese fenómeno también puede afectarle a él.

Fase 4. Construcción de la distribución de probabilidad

Esta es la fase culminante del proceso ya que, una vez estructurado y analizado el problema, se trata de construir la ley de probabilidad para el parámetro en cuestión.

Las técnicas aceptadas en este protocolo para obtener las leyes de probabilidad son las de los intervalos, los cuantiles y la mixta (cuantiles, intervalos y bisección). Por otra parte hay que fijar en qué términos van a manejarse las probabilidades, si como probabilidades o porcentajes, como odds o como log-odds. La elección está en manos del experto, que ha de elegir la escala en que se sienta más cómodo. También se admite el uso de técnicas indirectas.

Para las distribuciones bivariantes se recomienda el método de las distribuciones marginal y condicionada. En el caso multivariado se sugieren simplificaciones como determinar primero todas las distribuciones marginales y después obtener del experto, por ejemplo, la mediana de una variable condicionada por un valor de otra variable que no sea la media, de modo que se obtenga un conjunto de distribuciones marginales y medidas de correlación.

Durante la construcción es conveniente que el analista trate de averiguar la misma información mediante preguntas distintas, de modo que se puedan detectar inconsistencias en las opiniones del experto, si éstas existen. Un ejemplo muy común de inconsistencia se pone de manifiesto cuando al ir representando la distribución obtenida se ve que los puntos se agrupan en dos zonas, en cada una de las cuales la curva interpolada es distinta a la otra. En general esto indica que a partir de algún punto del proceso el experto ha comenzado a considerar información que no ha tenido en cuenta antes o ha comenzado a enfocar el problema desde otro punto de vista. Esto ha de hacerse explícito y puede ser aconsejable rehacer la distribución.

Fase 5. Verificación

En esta fase se comprueba si el experto está conforme con la distribución que se ha generado con sus opiniones.

Se muestra al experto el resultado gráfico de lo extraído de sus opiniones y se le explica para verificar su conformidad. Es conveniente presentarle tanto la función de distribución como la de densidad, ya que esta última permite apreciar posibles formas irregulares que deben ser discutidas. El paso final es comprobar si el experto está dispuesto a apostar su propio dinero sobre la distribución que ha evaluado. Para esto el analista forma con ella sucesos igualmente probables e investiga si el experto presenta desconcierto al preguntarle sobre qué resultado apostaría. En el caso de que apueste por uno se le pregunta cuáles son las razones para ello. Si se encuentran problemas en esta etapa puede ser necesario repetir algunas fases del proceso según estime el analista.

Fase 6. Agregación

En esta fase se trata de obtener una única distribución a partir de las distribuciones evaluadas por distintos expertos.

Dada la concepción del protocolo como proceso individualizado y el temor a las relaciones destructivas que se dan en todo grupo se prefiere la combinación matemática de las opiniones frente a las discusiones de grupo, aunque se aceptan técnicas similares al método Delphi en que

se comparte la información pero no se dan relaciones destructivas. Estas técnicas se describirán en detalle en el próximo capítulo.

Fase 7. Discretización

En ocasiones puede ser conveniente, con el fin de simplificar los cálculos, pasar de una distribución continua (la evaluada por el experto) a una discreta, dividiendo el rango de posibles valores de la variable en varios tramos, seleccionando un punto representativo en cada tramo y asignándole a éste la probabilidad de todo el tramo. Suele ser conveniente en este proceso que la variable discretizada conserve la media, la varianza y otros parámetros de interés. Para ello Miller y Rice ^[74] sugieren un procedimiento basado en una técnica de cuadratura gaussiana. Otro modo alternativo es dividir el rango de la variable en intervalos cuyos centroides estén simétricamente espaciados, en defecto y exceso de probabilidad, respecto al delimitador de intervalo.

Baste como dato final sobre este protocolo que el tiempo que puede llevar el mismo está entre la media hora (bastante improbable) y las dos horas. En general se suele prevenir a los expertos de que se les requerirá aproximadamente durante medio día para cada parámetro cuya incertidumbre se pretenda obtener de ellos.

IV.2.2. El protocolo de Morgan y colaboradores

Morgan y colaboradores ^[49] consideran el protocolo del SRI como bueno, pero parten del principio de que no tiene por qué ser el único modo de realizar el proceso, y además creen que en algunos casos puede no ser el mejor. El principio de este procedimiento, no tan rígido como el anterior, es que puede modificarse en función del problema estudiado.

Previo a lo que es el proceso formal de objetivación, los analistas han de realizar una labor de documentación sobre el tema de interés acudiendo a la bibliografía más relevante aparecida en los últimos años (la cantidad de estos años depende del tema estudiado). De esa bibliografía se extraen los resultados de mayor interés y, junto con la lista bibliográfica, se envían a los expertos. Simultáneamente se les envía un documento que compendie en no más de cincuenta o sesenta páginas los resultados más significativos sobre los sesgos del conocimiento disponibles en la bibliografía. Morgan duda que estas acciones tengan efectos determinantes, pero entiende que es conveniente hacerla por tres motivos: ayudará a los expertos a comprender por qué en el proceso de objetivación algunas cosas se hacen como de hecho se hacen, constituye una toma de contacto con los expertos y puede darles a entender la seriedad y minuciosidad que trata de darse al trabajo; además, puede considerarse como una respuesta a la obligación moral de mostrar al experto los inconvenientes y deficiencias que un proceso formal puede presentar antes de involucrarlo en él.

Realizado esto se puede comenzar el proceso formal, que consta de cinco fases y se realiza en el lugar de trabajo del experto de modo que tenga a su alcance la información de que habitualmente dispone. Se comienza el proceso con una charla de diez o veinte minutos en la que se pone al experto al corriente del problema general que se pretende resolver y la importancia de la opinión que a él se le pide para resolver el problema. A continuación se dedica una media hora, o más si el experto lo demanda, a revisar el documento sobre los sesgos del conocimiento. Morgan hace notar que este documento suele ser considerado interesante por los expertos. La tercera fase del proceso es una discusión técnica en que se trata de ver cómo enfoca el experto el tema, cuál considera que es el estado de la ciencia en ese campo, cuáles considera que son los datos más importantes de que se dispone y cuáles son los factores y procesos que pueden ser determinantes para resolver el problema. Esta conversación en la que pueden intervenir varios analistas además del experto puede prolongarse y llegar a entrar en detalles de interés mostrados en la bibliografía. De la conversación se toman todas las notas que se consideran interesantes, pero no se graba nada para dar confianza al experto y garantizarle el anonimato si así lo desea.

Finalizada la tercera fase se lleva a cabo la fase de estructuración tal como se desarrolla en el protocolo del SRI. Finalmente se pasa a la fase de creación de las funciones de distribución. Para esta fase se consideran utilizables cualquiera de las técnicas descritas en el apartado IV.1. Se sugiere tratar siempre de contrarrestar la sobreconfianza inducida por el sesgo de anclaje y ajuste. Para ello es conveniente utilizar la técnica de los cuantiles y comenzar las preguntas no por valores de centralización como la mediana sino por valores extremos, como se indica en el apartado IV.1.2.2.1. Una de las posibles preguntas para ampliar los rangos del parámetro es poner al experto en la situación de alejarse del área de interés durante unos años y retomararlo después, percatándose de que los valores aceptados entonces se salen de los límites dados por él en su día, y preguntarle por posibles motivos para que eso ocurriese. Se sugiere también escoger los puntos sobre los que se pregunta en orden arbitrario y no mostrar al experto los resultados parciales según se van registrando para identificar posibles inconsistencias. Las inconsistencias pueden resolverse sobre la marcha con meras preguntas o después de generada la distribución comentándolas con el experto. También pueden aplicarse técnicas para la normalización de distribuciones incoherentes como las propuestas por Lindley, Tversky y Brown ⁽⁸⁰⁾ y que se han comentado en el apartado IV.1.2.1.

Como se ha visto hasta ahora las técnicas utilizadas para combatir los sesgos se basan esencialmente en prevenir al experto, haciéndole ver el efecto de los mismos, y en interactuar con él de modo que modifique su opinión para atenuar el sesgo. Los autores de este protocolo apuntan otra posibilidad, aunque la desaconsejan y no la han utilizado, que consiste en admitir que los expertos suelen estar mal calibrados, por lo que podría pensarse en construir su curva de calibrado con cuestiones adecuadas. Esta curva se puede utilizar para recalibrar al experto, es decir, para transformar las funciones de distribución que genere, obteniendo otra supuestamente afectada de menor sesgo.

Esto presenta tres problemas. El primero consiste en que construir una curva de calibración lleva tiempo y precisa gran cantidad de preguntas sobre temas afines al de interés, que pueden ser difíciles de diseñar. El segundo es que la recalibración puede introducir incoherencias. El tercero, y más importante, es el sentimiento de desconfianza mutua que puede surgir entre el experto y el analista si el experto percibe que sus opiniones no están siendo tomadas directamente. El experto ha de estar siempre de acuerdo con lo generado a partir de sus opiniones.

Morgan y colaboradores consideran que se pueden utilizar técnicas indirectas, como por ejemplo la lotería de referencia, para ayudar al experto a emitir sus probabilidades, y que durante la fase de construcción hay que hacer que el experto se sienta cómodo, para lo cual el analista debe ser flexible. Así, si el experto expresa su deseo de dar directamente una distribución se le debe permitir, aunque advirtiéndole sobre el riesgo de sobreconfianza. Esta última fase puede llevar entre una y dos horas.

Un protocolo bastante parecido a éste fue el diseñado por el Prof. Wallsten en 1984 ^[49] para abordar el problema que le propuso la Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS) de la EPA, referente a la inclusión del juicio de expertos en el proceso de decisión sobre la Norma para regular la cantidad máxima de plomo en suspensión en el aire.

IV.2.3. El protocolo NUREG-1150

Este protocolo, recomendado por Keeney y Von Winterfeldt ^[47], surgió tras varios años de investigación sobre la generación de datos de entrada para evaluaciones de seguridad. Estos estudios tuvieron su génesis en las amplias críticas que sufrió el modo de utilizar el juicio de expertos en el estudio WASH-1400 ^[1], y sus esfuerzos se plasmaron posteriormente en su aplicación a los procedimientos de objetivación del juicio de expertos utilizados en el estudio de seguridad NUREG-1150 ^[3]. El protocolo, que ha sido adoptado por SNL como marco global para la caracterización de las incertidumbres en diversos estudios, consta de seis fases genéricas que se pueden amoldar a las peculiaridades de la incertidumbre que se quiera resolver. Está descrito extensamente en la referencia 7. Un esquema general de este protocolo puede verse en la figura 4.5.

Fase 1. Selección de temas

Cuando se plantea la resolución de un problema pueden surgir temas de interés que van desde lo más genérico, como el diseño de un modelo conceptual que explique razonablemente los estados presentes y futuros de un sistema, hasta lo más específico, como podría ser el valor concreto de un parámetro utilizado en un submodelo del modelo conceptual. En esta fase se trata de identificar todos los temas que son importantes y que están afectados de incertidumbre, algunos de los cuales necesitarán del juicio de expertos.

Para ello es necesario desarrollar una primera lista de temas potencialmente importantes, para lo cual los autores del protocolo aceptan incluso sugerencias de grupos del público que estén interesados. En esta primera selección de temas es preferible pecar por exceso que por defecto. De esta selección inicial se hace una criba atendiendo a la relevancia de los temas con respecto al problema que se aborda. Posteriormente hay que establecer las necesidades de información que requieren los temas seleccionados, identificando los diversos modos de adquirir dicha información y sus costes, precisión y disponibilidad asociados. El resultado de este proceso es una lista de temas que demandan la utilización del juicio de expertos. Estos temas todavía podrán dividirse en subtemas, algunos de los cuales pueden ser resueltos por experimentación o desarrollos teóricos mientras que otros seguirán demandando el uso del juicio de expertos. Los temas o subtemas finales, que deberán ser planteados como preguntas correctas que puedan pasar la prueba del clarividente, darán lugar a los respectivos procesos de objetivación del juicio de expertos.

Fase 2. Selección de los expertos

En este protocolo, a diferencia de los mencionados anteriormente, se consideran tres tipos de expertos: expertos especialistas o *expertos*, expertos generalistas o *generalistas* y expertos en normativa o *analistas*. Los generalistas son personas con un buen conocimiento del problema general y con conocimientos específicos en alguna de las disciplinas que intervienen en él, sin que tengan que ser investigadores punteros, y normalmente están relacionados con el tema que se va a someter a juicio de expertos. Los expertos han de ser buenos conocedores del tema y, si es posible, investigadores punteros en el mismo. Los expertos no tienen por que haber tenido contacto previo con el problema general. Los analistas han de ser buenos conocedores de teoría de probabilidades y psicología.

a) La selección de generalistas

Los generalistas son supervisores de todo el proceso y aportan control de calidad a los modelos y análisis que se desarrollan. Estos expertos se suelen escoger entre la plantilla de la empresa interesada en resolver el problema. Se les exige que tengan buenos conocimientos técnicos, capacidad organizativa y de interacción con las personas. Serán además el nexo, en el plano técnico, entre expertos y analistas y tendrán entre otras misiones la de establecer agendas y suministrar la información necesaria.

b) La selección de expertos

El primer paso es obtener una lista de potenciales expertos, para lo cual se admite la contribución de cualquier persona o institución interesada en el tema. De hecho se plantea la posibilidad de una solicitud pública de propuestas de nombres, dando in-

cluso la posibilidad de que una persona pueda proponerse a sí misma. Con esto se consigue una lista que habrá que depurar. Para esta tarea el principal criterio que ha de seguirse es que el experto sea realmente un experto. El proceso de selección consiste en la revisión del *curriculum vitae*, la entrevista personal y la opinión de otros especialistas en el tema. Esto último es muy importante: que el experto sea considerado como tal por sus colegas. Una lista exhaustiva de puntos específicos de interés para consultar en el curriculum, la entrevista y la información aportada por colegas se da en la referencia ^[74]. Otro punto a favor de la selección del experto es que no ponga inconvenientes a añadir su nombre a sus opiniones. En el mismo documento se opina que el mayor o menor anonimato puede restar calidad a los resultados. Si el experto pasa estas “pruebas” sólo se requiere que desee participar en el proceso y tenga tiempo para ello.

Un punto que ha de tenerse muy en cuenta es la posible existencia de sesgos motivacionales en el experto. Una alternativa posible para detectar estos sesgos consiste en solicitar a cada experto una declaración de posibles sesgos motivacionales que pudiera presentar. Como en otros protocolos sólo se considera la exclusión del experto en casos extremos.

Cuando se quiere garantizar la mayor amplitud de planteamientos y puntos de vista diferentes se tienen que elegir varios expertos sobre un mismo tema. Basándose en las ideas de Clemen y Winkler ^[87] expuestas en el tema sobre combinación de opiniones de expertos se sugiere un número de expertos entre tres y cinco. Se trata de obtener independencia (no total desde luego) entre los expertos a partir de la diversidad. Esta diversidad se busca en las fuentes de información, los procesos de razonamiento (diferente formación científica), la diferente aproximación al problema (experimental frente a teórica) y la diferente experiencia profesional.

c) La selección de analistas

A estos expertos se les solicita, además de los ya mencionados conocimientos de teoría de probabilidades y psicología de los procesos mentales, experiencia, si es posible, en la aplicación de las técnicas que conocen. Es importante que hayan tenido contactos previos con técnicos y científicos en procesos similares y que sean capaces de hacerles sentirse cómodos a la hora de expresar sus opiniones y razonamientos. Como en el caso de los especialistas, para su selección puede recurrirse a examinar el curriculum y consultar a colegas y expertos con los que haya mantenido alguno de estos procesos y entrevistas personales. Su capacidad de analista puede comprobarse utilizando al personal de la plantilla como expertos.

Fase 3. Entrenamiento

Esta es una fase a la que se atribuye gran importancia y con la que se pretende alcanzar tres objetivos:

1. Familiarizar al experto con los procesos de objetivación del juicio de expertos y motivarlo para que dé opiniones formales.
2. Entrenarlo en las técnicas para la emisión de estos juicios formales.
3. Darle conocimientos sobre los posibles sesgos y enseñarle a eliminarlos.

Esta fase puede llevar en torno a un día y se lleva a cabo en forma de reunión interactiva entre un analista y uno o varios expertos, con la asistencia de algunos generalistas.

Conseguir el primer objetivo pasa por admitir la extrañeza que puede causar a los expertos el modo en que se les va a pedir que den la información, que tiene poco que ver con la aplicación del método científico con el cual ellos se desenvuelven. En concreto pueden temer que se les pida información mucho más precisa de la que pueden dar y en forma de probabilidades, a lo que quizás no estén acostumbrados, además del temor a que se dé un uso incorrecto a su información. En las reuniones ha de comentarse explícitamente cuál es el problema general y dónde encaja lo que a ellos se les pide, y por qué han sido escogidos para dicha tarea. También se deben comentar los motivos que llevan a obtener la información de este modo. Ha de dejarse bien claro que no se trata de acertar o errar, sino de ser claros, mostrando lo que se sabe y lo que no se sabe sobre el tema. También es conveniente darles a conocer el uso que se dará a su información. Asimismo se deben recordar ciertas nociones básicas de teoría de probabilidades y aclararles el concepto de preguntas bien y mal definidas, para lo cual es conveniente explicar la prueba del clarividente.

La consecución del segundo objetivo pasa por dar práctica a los expertos en tres tareas principales:

- Hacer explícitos los juicios implícitos.
- Descomponer tareas.
- Emitir juicios en términos de probabilidades.

En esta fase debe haber una interacción con los expertos, animándoles a que hagan preguntas sobre los fenómenos que se les van explicando. Ha de incitárseles a emitir opiniones sobre algunos temas y hacerles ver las hipótesis que implícitamente están adoptando. También se les plantearán problemas y se les ayudará a resolverlos con técnicas de descomposición, y finalmente deben contestar preguntas en términos de probabilidades, comenzando con preguntas de cultura general, sencillas, y aumentando en complejidad hasta llegar a plantear preguntas del estilo que se plantearán en la sesión real.

Para conseguir el tercer objetivo se sugiere dar a conocer la naturaleza de los principales sesgos motivacionales y de conocimiento por los que pueden verse afectados, con profusión de ejemplos, para pasar después a mostrarles los tipos de preguntas y sugerencias que se les harán para contrarrestar su efecto. Estas cuestiones pueden ser del siguiente tipo: “Supóngase un experto que ha dicho que una magnitud no puede superar cierto valor bajo ningún concepto. En este caso podríamos preguntarle si sería capaz de jugarse todos sus bienes contra 1.000 pesetas a favor de que la magnitud no superará el valor límite”. Para poner sobre aviso del sesgo de sobreconfianza vuelve a ser pertinente realizar algún ejercicio de curva de calibrado.

Los autores de este protocolo advierten también de los posibles sesgos que podrían introducir los analistas, entre los que se encuentran la utilización excesiva de técnicas para eliminar sesgos, produciendo sesgos en sentido opuesto (llevar límites de parámetros mucho más allá de lo que los expertos realmente creen), introducir sin intención valores que producen efecto de anclaje, imponer escalas de medida con las que no maniobran bien los expertos, o no entender correctamente el problema técnico que se pretende resolver. Para evitar estos sesgos se recomienda la utilización de más de un analista y la revisión del proceso por otros colegas.

Fase 4. La sesión de objetivación

La sesión de objetivación recomendada no aporta nada nuevo, está basada esencialmente en los procedimientos descritos en los dos protocolos anteriores, beneficiándose de las ventajas de ambos. Las dos únicas peculiaridades que podrían considerarse son la posible redefinición de lo que se pretende caracterizar, entendiendo esta redefinición en cuestiones de detalle, ya que la definición es previa a la selección de los expertos y éstos podrían aportar opiniones importantes sobre dicha definición, y la posible realimentación de los expertos con la información obtenida de otros si a la hora de combinar las opiniones se plantea llegar a un consenso. Como en los demás protocolos este se considera como procedimiento orientado a extraer la información de los expertos por separado, aunque no se descarta la posibilidad de desarrollar sesiones con varios expertos buscando el consenso.

Fase 5. La combinación de la opinión de los expertos

En principio se aceptan todas las posibilidades que se comentarán en el capítulo V sobre combinación del juicio de expertos, pero se da el consejo de realizar varias combinaciones de las posibles. Esto producirá en general distintos resultados que motivarán a pensar sobre su origen, pudiendo identificarse entre las combinaciones propuestas la más conservadora, la que produce un resultado con mayor incertidumbre (en términos de varianza), o que goza de alguna otra peculiaridad. Dos cosas sí se dejan claras: que no se reduzca artificialmente la incertidumbre y que junto a las

posibles combinaciones se suministren siempre las opiniones originales dadas por cada uno de los expertos, con las cuales estaban de acuerdo.

Fase 6. Documentación

Esta es una fase a la que se da mucha importancia en este protocolo pues su correcta y exhaustiva realización se considera que mejora apreciablemente la calidad del estudio, dejando un registro de todo lo más relevante del proceso de objetivación en cada una de sus fases. Así, han de registrarse todas las labores previas a la propia interacción con el experto y la extracción de su información, es decir, desde todas las labores y criterios utilizados en la selección de expertos hasta el modo en que se realiza el entrenamiento, pasando por la selección de los temas de interés.

En lo que se refiere a la sesión de objetivación ha de registrarse todo lo utilizado, comenzando por la definición inequívoca del parámetro o tema de interés y de los conceptos manejados y los nombres de las personas involucradas en el proceso. Han de mencionarse las hipótesis en que se sustentaron los juicios, el modo de abordar el problema y el modo de realizar la desagregación si fuese necesario. Ha de cuidarse la diferenciación entre los datos tal cual los aportó el experto, las respuestas a preguntas concretas, y las labores realizadas sobre estos datos, por ejemplo la aplicación de técnicas de interpolación o el modo en que se combinaron las diferentes opiniones para producir una única opinión. Han de especificarse también las pruebas de consistencia realizadas sobre los juicios del experto.

Para esta fase se recomienda el diseño de impresos lo suficientemente generales para ser utilizados en un amplio abanico de problemas particulares. Se considera labor del analista demostrar todo lo referente a la extracción de la información del experto, y del generalista y el experto documentar todos los razonamientos técnicos y científicos.

Se considera también el problema del anonimato de los expertos. Los autores del protocolo no son partidarios del anonimato. Consideran que los expertos se ven más motivados para ser claros, precisos y consistentes si saben que su nombre irá asociado a sus opiniones.

Para cada una de estas tareas las técnicas de análisis y las peculiaridades del proceso formal de objetivación son diferentes. Con el objeto de apreciar las diferencias con respecto a los protocolos diseñados para la evaluación de distribuciones de probabilidad presentados anteriormente se comentarán a continuación los aspectos generales de un proceso de objetivación para la identificación inicial de los sucesos y procesos que pueden ser importantes para la seguridad futura de un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad.

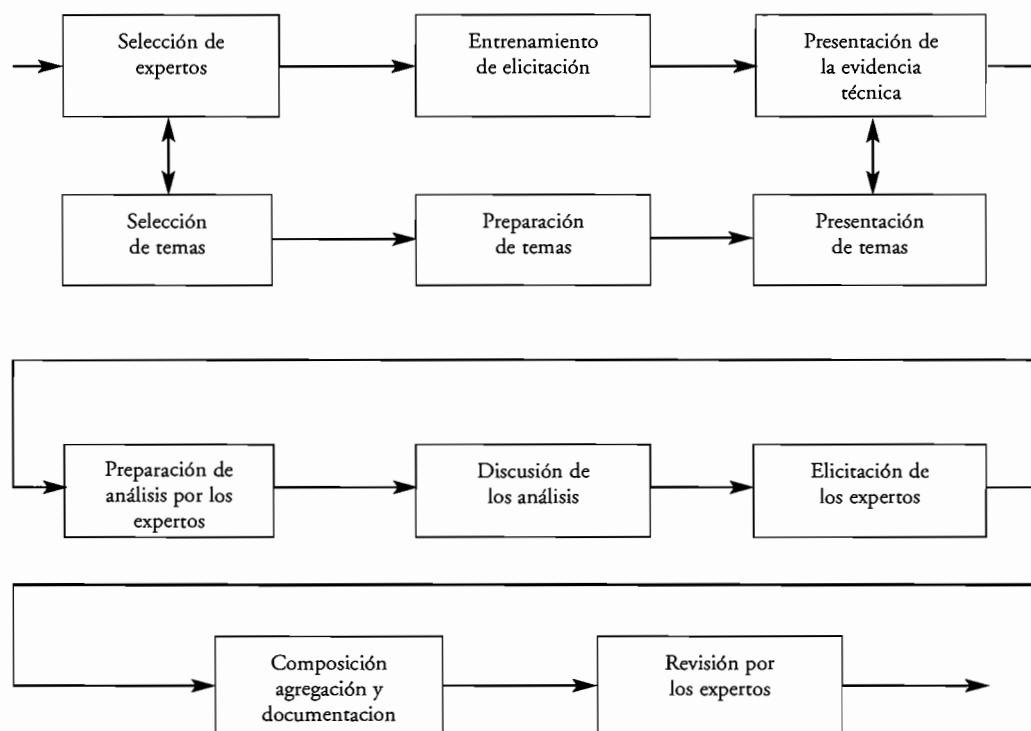


Figura 4.5. Etapas principales en el proceso de objetivación del juicio de los expertos (NUREG-1150) ⁽³⁾

La elaboración de un listado inicial de sucesos y procesos físicamente posibles es una tarea creativa que puede depender casi exclusivamente del juicio de los expertos. Lo que hay que asegurar en dicha lista es la exhaustividad, es decir, la inclusión de todos los sucesos y procesos potencialmente significativos. La objetivación formal del juicio de expertos puede ayudar a reducir el riesgo de que se hayan excluido algunos sucesos o procesos importantes. En este proceso deben participar varios generalistas, analistas y expertos. Los expertos tienen que pertenecer a varias áreas de conocimiento como la geología general, sismología, vulcanología, tectónica, climatología, hidrología, etc. Además, dado que el comportamiento humano futuro también puede influir en la seguridad del almacenamiento (intrusión), se deben incluir historiadores, sociólogos y psicólogos para tratar el tema del cambio tecnológico.

Los generalistas explicarán a los expertos la forma en que sus juicios contribuyen a la evaluación de seguridad, y los analistas los entrenarán en técnicas de identificación: *inducción hacia delante y hacia atrás, identificación guiada por objetivos e identificación mediante analogías*. La inducción hacia adelante consiste en crear árboles de sucesos que parten de sucesos iniciales y pueden acabar en sucesos que ocurrirían dentro de miles de años. En la inducción hacia atrás se fijan los estados finales indeseables y se buscan, también mediante árboles de sucesos, las sucesiones de sucesos y procesos que pueden llevar a esos estados. La identificación guiada por objetivos consiste en identificar los objetivos que debe cumplir el almacenamiento y generar sucesiones de sucesos y procesos que pue-

den conducir a muy malos resultados respecto a esos objetivos. Esta es una técnica que va muy directa a buscar los peores casos. En la identificación mediante analogías se busca una instalación con algún punto común, por ejemplo una mina de carbón con gas letal, y se buscan los sucesos y procesos que pueden llevar a resultados peligrosos. Después se comprueban qué efectos tendrían esos sucesos y procesos en el caso del almacenamiento. En el entrenamiento se animará a los expertos a que utilicen todas las técnicas para explotar al máximo las posibilidades. Además, ya que a la hora de generar sus listas los expertos pueden basarse casi exclusivamente en la información actual, que no necesariamente representa el futuro, se les debe sensibilizar al sesgo de disponibilidad.

En general el protocolo precisará una reunión entre los generalistas, analistas y expertos para la presentación, suministro de información y entrenamiento, un período intermedio para que los expertos elaboren sus juicios y listas y una reunión final para la discusión de los resultados y la propuesta final de cada experto. Posteriormente habrá que combinar estas listas individuales para generar una sola lista, para lo cual hay que tener en cuenta que los criterios con los que cada experto ha generado su lista pueden ser diferentes, de modo que la consistencia de la combinación sólo será posible mediante la reestructuración o el cambio de nomenclatura de tales criterios. Es conveniente hacer saber a los expertos estas modificaciones para que no estén en contradicción con lo que pensaron a la hora de confeccionar sus listas. Finalmente, todo el proceso y sus resultados deben ser documentados para permitir posibles revisiones.

IV.2.4. Análisis de la peligrosidad sísmica

Este análisis trata de estimar la probabilidad de que se excedan movimientos del terreno debidos a terremotos en una localización determinada y en un periodo futuro determinado. El procedimiento para tratar este tema abarca tanto una guía técnica como una guía procedimental. El hecho más significativo de esta estimación es que ésta lleva inherente importantes incertidumbres. A pesar de las investigaciones llevadas a cabo, existen aspectos desconocidos sobre la comprensión de los mecanismos que causan los terremotos y sobre los procesos de propagación de la energía de los mismos. La información existente es interpretada de forma diferente por los distintos expertos, y estas interpretaciones son trasladadas en forma de importantes incertidumbres a los resultados numéricos de los análisis.

Estos hechos dieron lugar a que organismos e instituciones tales como la NRC, EPRI y el DOE americanos patrocinaran un estudio para desarrollar una metodología con los objetivos de:

1. Conocer cómo usar apropiadamente estas diferentes interpretaciones.
2. Cómo incorporar los diferentes Juicio de Expertos en unos resultados analíticos que capturen apropiadamente el estado del arte de los conocimientos de la comunidad, incluyendo las incertidumbres.

El objetivo es desarrollar guías que incluyan una metodología conveniente para la realización de los análisis de la peligrosidad sísmica de las plantas nucleares y de otras instalaciones.

El estudio ha sido llevado a cabo por el “Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC)” soportado por otro gran número de expertos guiados por este Comité. A lo largo del estudio, el Comité revisa estudios existentes observando qué parte de los errores son de procedimiento, además se hace notar la importancia de que el estudio sea estructurado, elemento crítico para el éxito del mismo.

Para el Comité Senior para el Análisis de la Peligrosidad Sísmica (SSHAC), los aspectos más importantes de este proceso tienen que ver en primer lugar con los expertos, su interacción y los métodos para trasladar sus puntos de vista en datos de entrada útiles para el análisis probabilista del riesgo sísmico (PSHA). Este Comité da un significado particular al papel asignado al grupo encargado de la integración/facilitación que organiza y dirige el proyecto, y al uso que éstos hacen de los expertos.

En el proceso se identifican diferentes papeles de los expertos, el experto como promotor de una propuesta técnica específica, como evaluador de varias propuestas en la comunidad científica y como integrador técnico. También se identifican cuatro tipos de consenso, y se establece una jerarquía de complejidad para los temas técnicos, que consiste en cuatro niveles, que representan un nivel creciente de participación de los expertos.

El nivel más complejo consiste en un proceso formal y estructurado y se introduce el concepto de “technical facilitator/integrator” (TFI), describiéndolo como una entidad única que tiene la responsabilidad y el encargo de representar el estado de información de la comunidad científica relativo al tema técnico. El TFI puede ser una persona o un grupo pequeño de expertos. El proceso se centra en la interacción de expertos bien documentados como el principal mecanismo de integración. El mayor estímulo para esta labor es la necesidad de resolver las diferencias en la peligrosidad sísmica estimadas por LLNL y EPRI. En los procesos de Juicio de Expertos empleados para estimar estas peligrosidades sísmicas de 69 emplazamientos situados en la zona Este de EE UU, se identifican seis áreas en las cuales se pueden realizar mejoras:

1. Excesiva responsabilidad difusa.
2. Insuficiente interacción cara a cara entre los expertos.
3. Esquemas de agregación inflexibles.
4. Objetivos demasiado estrechos o imprecisos.
5. Expertos externos.
6. Insuficiente realimentación.

Proceso TFI (Technical Facilitator/Integrator)

La metodología TFI propone siete etapas. La metodología fue sugerida por Keeney y Winterfeld (1991).

1. Identificación y selección de temas técnicos.
2. Identificación y selección de expertos.
3. Discusión y refinamiento de temas técnicos.
4. Entrenamiento para elicitación.
5. Interacción del grupo y elicitación individual.
6. Análisis, agregación y resolución de desacuerdos.
7. Documentación y comunicación.

Un esquema del proceso aplicado a la elicitación del movimiento del terreno puede verse en la figura 4.6.

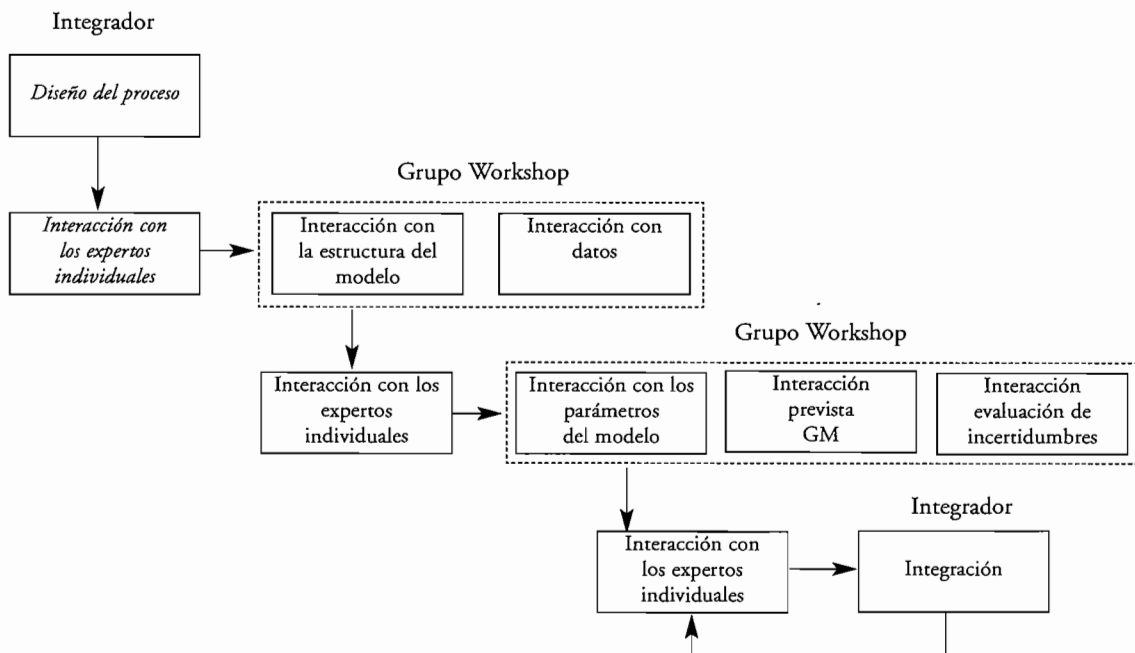


Figura 4.6. Esquema del proceso de elicitación TFI/TFI ⁽¹²⁾

El proceso TFI requiere procedimientos cuidadosos y con gasto de tiempo importante con el objeto de asegurar que todos los participantes tienen claro los objetivos del estudio, su papel y los resultados que se pretenden. Este proceso ha sido comentado por la National Research Council en el sentido de que es esencial que, si más de un TFI es asignado a trabajar en el análisis particular de

un proyecto, todos ellos deben estar por igual bien cualificados. Así mismo se comenta que el proceso es caro, de gran consumo de tiempo para todos los participantes. También se comenta que este proceso se justifica cuando es comprendido por el proyecto patrocinador y sus analistas. En cada paso del proceso de elicitación, se tiende a una completa comprensión por cada experto de todos los temas técnicos.

En cuanto a la integración de la opinión de los expertos, en teoría siempre es posible formular el problema de la integración de los expertos como un problema bayesiano en el que las opiniones de los expertos sean vistas como unas observaciones e interpretaciones de los parámetros de interés. La dificultad está en la formulación de un modelo de observación ajustado a cada actividad de combinación de expertos y a veces en la implementación del análisis bayesiano para producir *a posteriori* las incertidumbres.

Uno de los mayores problemas siempre es la agregación de los datos aportados por los diferentes expertos, especialmente cuando una o más opiniones de los expertos son opiniones externas con respecto a la visión del resto de los participantes. Este problema ha dado lugar a la consideración de pesar las diferentes opiniones de los expertos basadas en consideraciones cualitativas o cuantitativas sobre el grado de experiencia. En el proceso se favorece una forma de integración basada en dar igual peso a cada uno de los expertos. A veces puede haber confusión entre la combinación lineal dando igual peso a los expertos y el tratamiento simétrico de las opiniones de los expertos.

Un objetivo del proceso es que los participantes lleguen a familiarizarse al comienzo del ejercicio con los modelos y metodologías. En el proceso interactivo se acerca el rango de las estimaciones cuando los expertos aumentan su conocimiento y su comprensión, de los temas y de los métodos. Otro es que todos los expertos participantes estén en mejores condiciones para hacer juicios informados independientemente.

La revisión independiente es una parte integral del proceso. Hay dos tipos de revisión: participativa a lo largo del proyecto y en la última etapa del proyecto.

La participativa implica un acceso frecuente y completo a lo largo de todo el proyecto por los revisores. Su ventaja es la oportunidad de deliberaciones con una realimentación independiente. Se deben establecer salvaguardias para preservar la objetividad del proceso de revisión.

La documentación es una actividad esencial del proceso pues facilita el reanálisis posterior, así como la actualización cuando se va disponiendo de nueva información, sin necesidad de rehacer

todo el análisis. Además se considera conveniente el presentar los datos de entrada empleados por cada uno de los expertos. En el proceso TFI, se proponen dos tipos de documentación; en primer lugar la documentación que tiene que ser parte del informe principal o de sus apéndices, totalmente accesible, y en segundo lugar la documentación soporte.

IV.2.5. Protocolo KEEJAM de JRC

Este protocolo ha sido desarrollado recientemente en el Centro Común de Investigación JRC por investigadores de dicho centro en colaboración con investigadores de la Universidad de Bolonia. Este protocolo, cuyo nombre es Metodología de Ingeniería del Conocimiento para la Adquisición del Juicio de Expertos y su Modelado (KEEJAM - Knowledge Engineering Methodology for Expert Judgment Acquisition and Modeling), está basado en la Ingeniería del Conocimiento ^[5] que podría tildarse de arte de adquirir y usar el conocimiento para resolver problemas complejos. Podrá comprobarse en ésta y posteriores páginas que este protocolo es claramente diferente del resto.

La premisa básica de que parten los autores de este protocolo es que el juicio de expertos es en última instancia un problema de conocimientos, de modo que sólo se podrá dar un tratamiento adecuado a este problema si se estudian en detalle los conocimientos sobre los que los expertos asientan sus juicios. Por tanto, se asume que ha de desplazarse el centro de atención de las opiniones finales que pudieren dar los expertos a las hipótesis, datos y en general conocimiento que los expertos usan al formular sus opiniones.

Entonces, lo que se plantea es adquirir el conocimiento y estrategias de resolución al problema que cada experto plantea, con la intención de analizar las diferentes estrategias planteadas por los expertos para construir a partir de ellas modelos autoconsistentes. Estos modelos se consideran representaciones del estado del conocimiento en el tema estudiado y su análisis puede ayudar a desentrañar el origen de las posibles discrepancias entre los expertos, si acaso las hubiere. Ese análisis podría ayudar también a identificar otras formas de imperfecciones en los juicios y razonamientos, como imprecisiones, vaguedades e incertidumbres, incluso en la propia caracterización de la incertidumbre. Además, los autores admiten la posibilidad de adoptar diferentes formalismos para adaptarse del mejor modo posible a la interpretación y modo de entender la incertidumbre por los expertos (esto en esencia consiste en admitir formalismos distintos a la teoría de la probabilidad bayesiana para caracterizar, interpretar y propagar la incertidumbre, como por ejemplo la teoría de los conjuntos borrosos).

El protocolo propuesto por este grupo consta de cinco fases, cada una de las cuales se divide en varias tareas. A continuación se detallan fases y tareas.

Fase 1. Comienzo

Esta fase consiste en un análisis preliminar del problema. Se comprueba si es posible y adecuado estudiarlo con este protocolo, se definen los requisitos de los modelos y modelos de razonamiento que han de desarrollarse. En esencia se trata de adaptar la metodología al problema que se pretende resolver, definir el equipo de proyecto y planificarlo.

Fase 2. Diseño

Se determinan las técnicas adecuadas para la representación de los tipos de conocimiento y estrategias de razonamiento que aparecen en la resolución del problema tratado, incluyendo también el tratamiento de las imperfecciones que se detecten tanto en el conocimiento como en las estrategias de razonamiento.

Fase 3. Adquisición del conocimiento y modelado

Esta fase se dedica a la adquisición del conocimiento a partir de todas las fuentes disponibles (expertos, documentación disponible y contexto del problema planteado) y el posterior desarrollo de un modelo conceptual para resolver el problema. Si el modelo conceptual es suficientemente complejo como para no poder realizar los cálculos que éste demande puede que sea menester desarrollar un código informático de cálculo.

Fase 4. Explotación y refinamiento

En esta fase se realizan los cálculos pertinentes con el modelo desarrollado para cada experto en la fase anterior. Se analizan los resultados del modo más crítico posible, se trata de explicar el porqué de lo obtenido y se mejora el mismo de acuerdo con lo sugerido por los expertos.

Fase 5. Resumen y documentación

Se realiza la recopilación final de los resultados y se genera la documentación de todas las tareas hechas y resultados obtenidos.

V. Combinación del Juicio de Expertos

V. Combinación del Juicio de Expertos

Tras un proceso de objetivación de juicio de expertos se dispondrá de varias funciones de distribución de probabilidad para los parámetros afectados de incertidumbre y cuyo valor es necesario conocer. En general siempre será conveniente combinar esta información para llegar a una única distribución que englobe todos los datos aportados por los expertos, puesto que la evidencia experimental muestra que la opinión agregada siempre es mejor, por término medio, que las opiniones individuales.

Para la agregación de opiniones se necesita algún modelo o regla de combinación. Las dos posibilidades básicas son los *métodos de grupo* y los *métodos analíticos*. Los primeros permiten la interacción entre los expertos para generar una única distribución de consenso. Entre las varias posibilidades, las técnicas más utilizadas son la *interacción total*, la del *grupo nominal* y la *Delphi*, que se diferencian en los distintos tipos de interacción que se permite entre los expertos. Por su parte, los métodos analíticos consisten en técnicas matemáticas que permiten llegar a una combinación coherente de las opiniones particulares, y se puede optar entre la *combinación lineal* y la *inferencia bayesiana*. Actualmente no existe ningún consenso acerca de qué métodos, los de grupo o los analíticos, dan lugar a mejores resultados. En realidad cada uno de ellos presenta características diferentes que los pueden hacer adecuados en función del tipo de tarea y los objetivos que se persigan.

V.1. Características generales de la combinación de Juicio de Expertos

Cuando se producen discrepancias entre las opiniones de varios expertos individuales es razonable producir una opinión global que permita manejar un caso base para el análisis. Pero antes de abordar los detalles técnicos de la combinación es necesario considerar ciertos aspectos del proceso que tienen que ver con las posibles causas de las discrepancias y con el modo de agregación que se va a utilizar.

Como norma general, antes de resolver las discrepancias mostradas por los expertos es necesario estudiarlas para intentar comprender su origen y consecuencias. De este modo las evaluaciones discrepantes se convierten en una importante fuente de información. Según Roberds ^[78] los motivos que pueden llevar a diferentes evaluaciones individuales se resumen del siguiente modo:

1. Desacuerdo sobre las suposiciones o definiciones que fundamentan la evaluación.
2. Dificultades en vencer los sesgos y errores de evaluación.
3. Utilización de diferentes fuentes de información.
4. Desacuerdo acerca de cómo interpretar la información disponible.
5. Diferentes opiniones o creencias respecto a las magnitudes que se están evaluando.

El analista debe considerar cuidadosamente estas cuestiones con el fin de detectar posibles diferencias no legítimas, acudiendo de nuevo a los expertos en caso necesario para verificar algunas de sus opiniones. Por ejemplo, se puede descubrir que un “experto” no lo era realmente o que algunos de ellos no han considerado una información muy relevante. Y también puede ocurrir que la cuestión formulada a los expertos esté sometida a más incertidumbre de lo que se creía, lo que puede llevar a reformular el análisis del problema.

Si se concluye que las diferencias entre los expertos son legítimas entonces hay que examinar en qué medida las diferencias en las opiniones afectan a los resultados, es decir, hay que realizar un análisis de sensibilidad. Si este análisis indica que el rango de opiniones no afecta significativamente a los resultados entonces la agregación de opiniones para obtener una evaluación global está justificada y no supone una pérdida significativa de información. Pero si el rango de opiniones influye decisivamente en los resultados habrá que considerar toda la información, por ejemplo realizando varias de las posibles combinaciones y el correspondiente análisis de sensibilidad o simplemente no realizando la agregación, admitiendo la gran incertidumbre a que está sometido el problema.

Una vez decidida la necesidad de resolver las discrepancias entre los expertos hay que seleccionar un método particular de agregación. En este punto es recomendable guiarse, entre otros criterios, por dos consideraciones de tipo general: el nivel de defendibilidad que requiere el análisis que se está realizando (por ejemplo ante los organismos reguladores o la opinión pública) y el grado de discrepancia entre las opiniones. A la hora de resolver las discrepancias se pueden distinguir tres resultados posibles:

1. *Convergencia*, una única evaluación expresa las creencias comunes del grupo de expertos y a la que todos se adhieren expresamente.
2. *Consenso*, se determina una única evaluación que no refleja las opiniones de todos los expertos y puede ser *forzado* (la evaluación única se realiza sin el deseo expreso de todos los expertos) o *por acuerdo* (la evaluación única se realiza con el deseo expreso de todos los expertos, renunciando varios de ellos a que se incluyan algunas de sus opiniones).
3. *Desacuerdo*, se dan múltiples evaluaciones porque no es posible la convergencia o el consenso debido a grandes diferencias de opinión.

La convergencia es la situación más defendible pero también la más difícil de conseguir, el consenso por acuerdo es algo menos defendible pero algo más fácil de obtener, y el consenso forzado puede ser muy difícil de defender pero muy fácil de alcanzar. El desacuerdo no es defendible.

La interacción de grupo permite a los expertos discutir y combinar sus juicios. En este proceso se intercambian las fuentes de información y los procesos inferenciales de cada uno de ellos, lo que puede llevar a la reconciliación de sus diferencias. Dependiendo del grado de reconciliación es posible obtener una convergencia de opiniones o bien un consenso. La agregación por interacción es particularmente útil cuando los expertos fundamentan sus opiniones en suposiciones muy diferentes, ya que la interacción induce a una consideración más profunda y extensa del problema que puede llevar a descubrir falsos razonamientos o interpretaciones. Ahora bien, cuando las diferencias son amplias y debidas a creencias legítimas que divergen, lo normal es que se produzca el desacuerdo. Además, hay que contar con un serio peligro en estos procedimientos, como es la presencia de relaciones interpersonales destructivas entre los expertos. También se debe tener en cuenta el gran esfuerzo de organización y tiempo que conllevan las reuniones entre expertos. Según Morgan y Henrion ^[49] en ciertos ámbitos como las ciencias y la ingeniería los expertos conocen la mayor parte de las opiniones de sus colegas bien por sus artículos o bien por contactos anteriores, por lo que creen que en estos casos los métodos de grupo sólo pueden producir pequeñas mejoras de las evaluaciones individuales.

Frente a este procedimiento de agregación la combinación analítica de las opiniones presenta ventajas obvias: fácil de usar, posibilidad de hacer varios análisis de incertidumbre para apoyar algún caso base y eliminación de la influencia personal de los expertos. Por ello es recomendable en las situaciones en que existen amplias diferencias de opinión difícilmente reconciliables. Sus desventajas están en que sólo puede producir un consenso forzado y que normalmente requieren suposiciones de tipo más o menos subjetivo por parte del analista para asignar diferentes pesos o grados de credibilidad a la opinión de cada experto.

Los estudios experimentales llevados a cabo en este ámbito no permiten decidir de forma definitiva sobre ninguno de ambos procedimientos, ya que existen evidencias que favorecen la agregación analítica y evidencias que favorecen la agregación por interacción. Estas evidencias conflictivas tienen su razón de ser, puesto que las ventajas de un procedimiento son las desventajas del otro y viceversa: mientras que la agregación matemática evita la influencia personal de los expertos no permite sin embargo compartir sus conocimientos e informaciones, lo que no cabe duda que puede aportar mayor claridad al planteamiento y resolución del problema. Por ello la idoneidad de un procedimiento u otro dependerá de las características de la tarea y de la magnitud y cualidad de la diferencia de opiniones. Por ejemplo los métodos de grupo se prestan bien al tratamiento de cualquier tipo de incertidumbre, mientras que los analíticos están restringidos a la de los parámetros. Finalmente una tercera posibilidad es la combinación de ambos procedimientos. En este caso se utilizaría en primer lugar la interacción de los expertos para el intercambio de sus datos, suposiciones y razonamientos y tras emitir sus evaluaciones individuales se recurriría a la agregación analítica para resolver las discrepancias residuales.

V.2. Combinación de grupo

La psicología social, que ha investigado ampliamente el efecto de los grupos sobre la formación y modificación de las opiniones, ha establecido que las opiniones de grupo poseen mayor calidad que la media de las individuales, aunque parece que en las tareas más complicadas rara vez se alcanza el nivel del miembro más preciso del grupo. Pero a su vez se ha constatado que en los grupos se producen dos fenómenos que pueden sesgar los resultados de forma importante: la presencia de *disfunciones* y el *desplazamiento de las preferencias*.

Las disfunciones más importantes que se pueden presentar en el comportamiento de un grupo son las siguientes:

1. Un efecto de *tendencia central*, por el cual el grupo tiende a seguir unas líneas de pensamiento limitadas.
2. Un efecto de *auto-pesado*, por el cual cada miembro del grupo participará o intentará ejercer influencia en la medida en que se sienta igual de competente que los demás.
3. Un efecto de *agenda oculta*, por el cual no se expresan algunas de las verdaderas opiniones.
4. *Presiones de grupo* para alcanzar el consenso y amenazas implícitas de sanciones por parte de los miembros más reconocidos.
5. La influencia de *personalidades dominantes*.

El desplazamiento de las preferencias consiste en un cambio de opinión inducido por factores psicológicos de grupo no relacionados con la tarea que se tiene que resolver. Por ejemplo existe evidencia experimental de que tras la discusión de ciertas alternativas que suponen un riesgo se tiende a modificar de forma sistemática las opciones iniciales individuales por otras que suponen un mayor riesgo, lo cual es debido, según una de las varias teorías que intentan explicar el fenómeno, a que la experiencia en grupo reduce la ansiedad acerca de las posibles consecuencias negativas de las decisiones porque se percibe que la responsabilidad está repartida entre los miembros del grupo.

Estas características del comportamiento en grupo han guiado la elaboración de métodos para la evaluación conjunta de las incertidumbres. Se trata de favorecer al máximo el intercambio de opiniones, argumentos e informaciones para mejorar la comprensión del problema pero evitando en la medida de lo posible los sesgos de grupo. Las posibilidades extremas son el grupo con *interacción total*, en el que se permite la discusión abierta y sin restricciones entre los expertos, y la *técnica Delphi*, que permite un intercambio por escrito de las opiniones de los expertos pero no su interacción directa. Un procedimiento intermedio entre estos dos es la técnica del *grupo nominal* en la que un analista controla la interacción directa de los expertos para evitar los sesgos.

V.2.1. Grupo con interacción total

En este caso se dispone de un grupo de expertos que se pretende produzcan conjuntamente y con interacción total una única opinión sobre el parámetro, suceso o escenario considerado, bien por convergencia o bien por consenso. El inconveniente fundamental de esta técnica está en que el resultado puede verse distorsionado por los sesgos de grupo. Otros inconvenientes, como una pobre cuantificación de la incertidumbre o la presencia de suposiciones implícitas, pueden darse en función del carácter más o menos formal con que se prepare el proceso. Por ejemplo, si previamente a la reunión no se ha especificado sin ambigüedades el problema o no se ha exigido una evaluación individual a los expertos para su posterior discusión es muy probable que la cuantificación de la incertidumbre sea difusa.

Woo opina que la interacción sin restricciones entre los expertos puede ser una técnica óptima para resolver incertidumbres de tipo cualitativo, en donde es fundamental la comunicación oral porque facilita el intercambio de opiniones.

Esta técnica del grupo con interacción total se utilizó para la evaluación consensuada de una distribución de probabilidad en la serie de evaluaciones del riesgo radiológico llevada a cabo por el HMIP (Her Majesty's Inspectorate of Pollution) en relación con el proyecto PACOMA. Antes de la reunión los expertos sólo recibieron un breve documento sobre el tema que tenían que evaluar y al comienzo de la misma un analista presentaba a los expertos, les recordaba el propósito de la reunión y les advertía sobre los sesgos motivacionales. Este analista jefe estaba acompañado por un analista de operación que mostraba al grupo, con ayuda de un ordenador, los resultados que se iban obteniendo. La técnica que se utilizó para construir la función de distribución fue la recomendada en el protocolo del SRI. Por último, un asistente se encargaba de documentar la reunión.

V.2.2 El método Delphi

Esta técnica es una forma estructurada de comunicación entre varias personas con el fin de alcanzar un consenso sobre cierta cuestión. El método fue desarrollado en los años 50 por la Rand Corporation para el ejército de EE UU con objeto de mejorar la calidad de las decisiones alcanzadas por consenso de grupo en el ámbito militar. Tras su desclasificación la técnica Delphi se hizo muy popular en los años 60 y 70, para declinar posteriormente su uso en los 80. Durante este tiempo han surgido algunas variantes que se diferencian del protocolo original que se comenta seguidamente en cuestiones de detalle para amoldarse a las características de ciertas tareas particulares.

La técnica comienza suministrando a todos los expertos seleccionados una misma documentación y se les pide que argumenten y generen, por escrito, una solución para el problema planteado.

Posteriormente cada participante recibe las soluciones de sus colegas, cuyo anonimato se preserva, y se le anima a que modifique su opinión inicial según crea conveniente a la luz de la información aportada por los demás. Este proceso se repite varias veces hasta que se alcanza el consenso o se llega a un punto en que las posturas no evolucionan sensiblemente de una iteración a otra. En este último caso la combinación final es matemática. Es muy importante que la redacción de las cuestiones que se someten a evaluación sea precisa y que no insinúe ningún posible valor inicial. El anonimato de los participantes garantiza que no se den sesgos de grupo en las respuestas.

Este esquema de realimentación controlada, que parece adecuado para evitar los sesgos de grupo, presenta sin embargo algunos inconvenientes. En primer lugar requiere bastante tiempo para su realización, y además el hecho de tener que dar una respuesta escrita y argumentada en cada una de las iteraciones puede hacer que los expertos se cansen y tiendan hacia un consenso ficticio. También se ha argumentado en contra de esta técnica que es difícil distinguir a los verdaderos expertos de los que no lo son y que no permite un control claro del proceso.

V.2.3. Técnica del grupo nominal

Este método aprovecha las ventajas de la discusión cara a cara pero evitando los sesgos de grupo, para lo cual se utiliza un analista que controla la reunión entre los expertos, intentando corregir cualquier desviación en ese sentido. El hecho de que la realimentación controlada se realice cara a cara evita el cansancio de los expertos que se puede producir en la técnica Delphi, ya que la comunicación oral siempre es más cómoda que la escrita.

Siempre se parte de unas evaluaciones individuales previas a la reunión que sirven como base inicial de discusión.

Roberds ^[78] describe un procedimiento estructurado para esta técnica del grupo nominal que consta de seis etapas:

- Motivación.
- Identificación de las diferencias.
- Discusión de los fundamentos de cada evaluación inicial.
- Discusión de las fuentes de información utilizadas.
- Reelaboración de las evaluaciones individuales.
- Reconciliación de las diferencias.

En caso de que no se llegue a un consenso se puede hacer una combinación matemática de los juicios individuales. El analista, además de intentar corregir los posibles sesgos de grupo, debe interactuar per-

manentemente con los expertos con el fin de conseguir, si es posible, un consenso sobre definiciones, suposiciones, fuentes de información, interpretaciones, etc.

En este ámbito de las decisiones de grupo se han realizado varios estudios para disponer de evidencias sobre la idoneidad de unos u otros procedimientos. Los resultados no aportan conclusiones definitivas, a lo que hay que añadir el hecho de que la mayor parte de ellos se hayan realizado en condiciones no significativas del comportamiento real de los expertos. En cualquier caso sí parece estar claro que los procedimientos estructurados (técnicas Delphi y del grupo nominal) son superiores a la mera interacción de grupo. Además, una técnica de grupo nominal bien estructurada y controlada puede evitar los inconvenientes de la técnica Delphi y aprovechar las distintas calidades individuales de los expertos.

V.3. Combinación analítica

La combinación analítica de las distribuciones de probabilidad se puede realizar de dos modos diferentes que darán lugar a resultados distintos. Los métodos analíticos hacen necesario considerar a la persona o institución interesada en la información agregada como un *decisor* que tiene sus propias ideas acerca de la incertidumbre que se pretende caracterizar. En la *combinación lineal* el decisor tiene que asignar a la información extraída de cada experto una importancia relativa en función de la mayor o menor credibilidad que le ofrezca cada uno de ellos. En la *inferencia bayesiana* el decisor tiene su propia opinión sobre la magnitud que se evalúa y las opiniones de los expertos se tratan como evidencias muestrales que sirven para actualizar su información mediante la fórmula de Bayes. Las ventajas e inconvenientes de cada procedimiento son complementarios. Así, la combinación lineal es más fácil de utilizar que la inferencia bayesiana, pero por el contrario los procedimientos desarrollados hasta hoy día no han hecho ningún esfuerzo por incorporar el importante tema de la correlación entre los expertos, aspecto éste que sí se puede considerar en la inferencia bayesiana.

V.3.1. Combinación lineal

La combinación lineal (*linear pool*) de opiniones consiste en lo siguiente: Supóngase que se dispone de m expertos a los que se les ha pedido que generen una función de densidad de probabilidad, $f_i(\theta)$, para un parámetro de interés θ . Considérese además que a cada experto se le asigna un peso w_i comprendido en el intervalo $[0,1]$ y sometidos todos ellos a la restricción $\sum \omega_i = 1$. Entonces la expresión

$$f(\theta) = \sum_{i=1}^m \omega_i f_i(\theta) \quad (34)$$

es la función de densidad de probabilidad agregada y se denomina combinación lineal de funciones de densidad de probabilidad. Es conveniente notar que las funciones que aparecen en la expresión (34) son totalmente genéricas, pudiendo estar definidas sobre un continuo o sobre un conjunto discreto de valores. Un enfoque alternativo, de naturaleza similar al anterior, es el correspondiente a la combinación lineal en logaritmos (*logarithmic pool*). En este caso el logaritmo de la función de densidad agregada es igual a la combinación lineal de los logaritmos de las funciones de densidad individuales

$$\log(f(\theta)) = \sum_{i=1}^m \omega_i \log(f_i(\theta)) \quad (35)$$

Para determinar los pesos ω_i que se asignarán a los expertos se pueden considerar dos tipos de procedimientos, los que se basan en apreciaciones subjetivas y los que utilizan algún tipo de ejercicio de calibración para determinar los conocimientos de los asesores. Entre los primeros se comentará la asignación de *pesos iguales*, muy utilizada, y la *técnica de Saaty*, en la que se ha de evaluar la calidad relativa entre expertos, y del segundo grupo se hará referencia al *método de Cooke*. De Groot ha propuesto un procedimiento iterativo para alcanzar el consenso en una distribución de probabilidad mediante la combinación lineal que no está contrastado experimentalmente. Inicialmente cada experto i debe evaluar una distribución $f_{i1}(\theta)$ y al igual que en la técnica Delphi posteriormente se le enfrenta con la de sus colegas. En vista de esta información debe modificar su evaluación asignando una importancia relativa w_{ij} a cada uno de los expertos ($\sum_j \omega_j = 1$), de modo que su distribución corregida es $f_{i2}(\theta) = \sum_j \omega_j f_{j1}(\theta)$. El proceso continúa hasta que las evaluaciones cambien poco.

V.3.1.1. Asignación de pesos iguales

Cuando se están buscando expertos para dar su opinión sobre una materia, salvo motivos de sesgos motivacionales insalvables, se busca a aquellos que mejores conocimientos poseen. Si no hay datos significativos que indiquen el mayor conocimiento neto de uno de los expertos respecto a los otros, una postura coherente es asignar pesos iguales a cada uno de ellos, $\omega_i = 1/n$, donde n es el número de expertos. El defecto de este esquema está en que no tiene en cuenta la posible correlación entre los expertos, aunque si ésta no existe, cosa difícil, y se dan las circunstancias mencionadas, no hay nada que objetarle.

V.3.1.2. Técnica de Saaty

La técnica de Saaty para comparar datos pareados es una de las varias herramientas diseñadas por dicho autor dentro de su *Proceso Analítico de Jerarquías* (Analytical Hierarchy Process, AHP). Esta técnica se ha utilizado principalmente en problemas de análisis de decisión con multiatributos para establecer jerarquías y ordenar los atributos en función de su importancia para el decisor, y es fácilmente adaptable a la tarea de asignación de pesos.

El método de Saaty surge a partir del reconocimiento explícito de la incapacidad del ser humano, decisor o experto en normativa en nuestro caso, para evaluar y comparar simultáneamente muchos factores, expertos en este caso. Sin embargo, el ser humano sí es eficaz a la hora de hacer comparaciones relativas entre factores dos a dos, por ejemplo cuando se le pide que indique orden de uno respecto a otro mediante calificativos como mejor, igual o peor. Por tanto, mediante este método se asignan pesos a los expertos atendiendo a la calidad que a cada uno de ellos atribuya el decisor. La principal ventaja de esta técnica es la sencillez y fácil comprensión de su aplicación.

Considérese un decisor que toma la opinión de n expertos y al que se le pide que para cada pareja de expertos, por ejemplo los expertos j y k , indique si considera a uno con más, menos o iguales conocimientos que al otro sobre el suceso o parámetro de interés. Esto supone realizar $n(n-1)/2$ comparaciones. Los calificativos *mejor*, *igual* y *peor* se asocian con tres valores reales $a > 1$, 1 y $1/a$ respectivamente. Saaty recomienda, en el caso mejor-igual-peor, establecer el valor $a = e$. Con los valores obtenidos se rellena una matriz cuadrada A de $n \times n$ elementos que asocia al elemento a_{jk} el valor asignado a la relación entre los expertos j y k ; los elementos de la diagonal son todos unos, como es lógico. Una matriz de este tipo, para cuatro expertos, podría ser:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2.72 & 2.72 & 2.72 \\ 0.37 & 1 & 1 & 0.37 \\ 0.37 & 1 & 1 & 0.37 \\ 0.37 & 2.72 & 2.72 & 1 \end{pmatrix}$$

que indica que el decisor considera al experto 1 mejor que los demás, al experto 2 igual al experto 3 y peor que el 4, y al experto 3 peor que al experto 4. A continuación se determinan los autovalores de esta matriz y se calcula el autovector $\bar{\Omega}^T = (\Omega_1, \dots, \Omega_n)$ asociado al mayor de los autovalores λ_{max} (recuérdese que $A\Omega = \lambda_{max}\Omega$). Los elementos de dicho autovector se dividen por la suma de los mismos, y las componentes del autovector transformado son los pesos que se asignan a cada uno de los expertos, la primera componente al primero, la segunda al segundo y así con los otros ($\omega_i = \Omega_i / \sum_{j=1}^n \Omega_j$). Haciendo los cálculos para el ejemplo mostrado se obtienen los pesos 0.46, 0.13, 0.13 y 0.28 para el primer, segundo, tercer y cuarto experto respectivamente.

Este método dispone de un modo de comprobar las posibles inconsistencias en que haya incurrido el decisor a la hora de asignar valores a los elementos de la matriz. Así, si en el ejemplo anterior el decisor considerara al experto 3 mejor que el 4, lo que supondría $a_{34} = 2.72$, se produciría inconsistencia porque los expertos 2 y 3, que los considera iguales, serían simultáneamente peor y mejor que el 4 respectivamente. Para identificar la presencia de estas posibles inconsistencias el método utiliza una *relación de consistencia*, CR, que se define como $CR = CI / RCI$, donde CI es el *índice de consistencia* de la matriz A y RCI es el *índice de consistencia aleatorio*. El índice de consistencia de la matriz se define como $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$,

mientras que el índice de consistencia aleatorio se obtiene de la siguiente tabla 5.1 en función del número de expertos n .

Tabla 5.1. Índice de consistencia aleatorio (RCI) para diferentes números de expertos (n).

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Un valor de CR mayor que 0.1 indica la presencia de inconsistencias, y en tal caso se debe invitar al decisor a revisar las comparaciones realizadas.

En relación a esta técnica de asignación de pesos se deben tener en cuenta dos hechos. En primer lugar, si el decisor se siente capaz de discernir más finamente entre la calidad de los expertos podría hacerlo, pudiendo calificar a un experto como mejor, ligeramente mejor, igual, ligeramente peor o peor que otro experto, y asignar valores reales $a > b$, $b > 1$, $1/b$ y $1/a$ a cada una de esas relaciones cualitativas entre expertos. Y en segundo lugar, se ha de tener en cuenta que esta herramienta fue concebida para establecer orden entre un conjunto de posibles elecciones, por lo cual interpretar los valores del autovector como pesos tiene cierto riesgo, aunque sí es cierto al menos que los pesos que proporciona la técnica respetan el orden en que el decisor aprecia la capacidad de cada experto para opinar sobre la materia de interés.

Esta herramienta, por su capacidad para establecer orden entre diferentes opciones o alternativas, podría ser de ayuda en otras fases del proceso de objetivación del juicio de expertos cuando las evaluaciones numéricas sean difíciles de realizar por el decisor o los expertos y el establecimiento de un orden entre varias alternativas sea de interés. Finalmente, sólo resta comentar que esta herramienta está implementada en forma de programa FORTRAN.

V.3.1.3. Método de Cooke

Este método se diseñó para evitar las objeciones derivadas de la asignación subjetiva de pesos y en su lugar se basa en el concepto de *precisión* de un experto. Según Cooke y colaboradores un experto es preciso cuando está calibrado y sus opiniones tienen capacidad de información. La calibración se refiere a que las frecuencias relativas de los hechos que evalúa el experto se aproximan o igualan a la probabilidad estimada por él. La capacidad de información de una distribución de probabilidad hace referencia a su mayor o menor dispersión. Las distribuciones más "difusas" tienen menos capacidad predictiva que las más concentradas porque aportan menos información. Así pues, lo que se pide a una distribución de probabilidad subjetiva es que esté calibrada y que posea capacidad de información. El método de Cooke mide estas dos características a través de las curvas de calibrado de los expertos y asigna los pesos valiéndose de una expresión que es función de sus valores.

Supóngase que el experto e evalúa las funciones de distribución F_{me} correspondientes a las variables de calibración X_m ($m=1, \dots, M$), cuyos valores reales son conocidos por el analista, y con las cuales se construye su curva de calibrado. Una medida global de la calidad del experto es el llamado *índice de calibrado*, $C(e)$, para cuya definición es necesario considerar R intervalos cuantílicos mutuamente excluyentes con probabilidades definidas p_1, \dots, p_R , a los que en el eje de coordenadas de la curva de calibrado les corresponderán las probabilidades s_1, \dots, s_R . Dado el modo en que se construye la curva de calibrado se puede decir que la distribución muestral $\{s_i\}$ se ha obtenido a partir de M muestras independientes de la población p . En estadística se define la información relativa de la distribución $\{s_i\}$ con respecto a la $\{p_i\}$ como:

$$I(s(e), p) = \sum_{i=1}^R s_i(e) \cdot \ln \left(\frac{s_i(e)}{p_i} \right), \quad (36)$$

y se demuestra que para un M suficientemente grande la variable $x = 2 \cdot M \cdot I(s(e), p)$ se distribuye como una χ^2 de R grados de libertad. Entonces el índice de calibrado para el experto e se define como:

$$C(e) = 1 - \chi_R^2(2 \cdot M \cdot I(s(e), p)). \quad (37)$$

Obsérvese que si el experto está perfectamente calibrado entonces $s_i(e) = p_i, \forall i$, con lo que $I(s(e), p) = 0$ y $x = 0$, y dado que $\chi_R^2 = 0$ para cualquier R resulta que a uno de estos expertos le corresponde un índice $C(e) = 1$. Para calibraciones inferiores $I(s(e), p) \neq 0$ y $C(e) < 1$. Por lo tanto el índice de calibrado del experto aumenta conforme aumenta la calidad de sus evaluaciones.

Para tener en cuenta la capacidad de información de las evaluaciones del experto se utiliza el concepto de *entropía*, que para una distribución de probabilidad $\{q_i\}$ se define como:

$$H = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln(q_i), \quad (38)$$

y su valor está en el intervalo $(-\infty, 0)$. Cuanto mayor sea la entropía más concentrada estará la distribución, es decir, poseerá más capacidad de información. Por ejemplo para la distribución $\{0.25, 0.25, 0.25, 0.25\}$ la entropía vale -1.39 , mientras que para la $\{0.05, 0.05, 0.1, 0.8\}$, más informativa, la entropía vale -0.71 . El método de Cooke utiliza una entropía media normalizada según la expresión:

$$H(e) = \left(\frac{1}{M} \right) \sum_{m=1}^M \frac{H(F_{me})}{H(u_m)}, \quad (39)$$

donde $H(u_m)$ es la entropía de una distribución uniforme definida sobre el rango de la variable de calibrado X_m evaluado por el experto.

Utilizando estos conceptos de índice de calibrado y entropía se define el peso ω_e para el experto e de la forma:

$$\omega_e \propto I_{\{C(e), \alpha\}} \cdot \left[\frac{C(e)}{H(e)} \right], \quad (40)$$

donde $I_{\{C(e), \alpha\}}$ vale 0 si $C(e) < \alpha$ y 1 si $C(e) > \alpha$. El parámetro α lo elige el analista para definir el calibrado mínimo que deben tener todos los expertos.

Un parámetro crítico en este modelo es el número M de evaluaciones de calibración. Para obtener calibraciones robustas el número mínimo se sitúa entre 8 y 10. Además, estas variables de calibración deben ser adecuadas para que los resultados sean representativos del comportamiento del experto en las variables de interés. Frente a estos inconvenientes, la dificultad para diseñar tareas de evaluación y el tiempo que se necesita, se pueden citar algunas ventajas, como por ejemplo que anima a los expertos a dar sus verdaderas opiniones y a esforzarse en el proceso de evaluación, que permite una evaluación objetiva de los expertos y que es fácil de utilizar. El método se ha utilizado en varios estudios, entre los cuales hay que destacar el dedicado al análisis de incertidumbres de los modelos de deposición y dispersión del material radiactivo de los códigos MACCS y COSYMA.

V.3.2. La combinación bayesiana del juicio de expertos

Cuando se asume un enfoque bayesiano para resolver el problema de la combinación de opiniones de diferentes expertos el decisor cuenta con la fórmula de Bayes como único método lícito para combinar la información de que dispone. Sea θ el parámetro cuya incertidumbre desea caracterizar un decisor, sea éste persona o institución, para lo cual recaba la ayuda de una serie de expertos sobre dicho parámetro. En este enfoque se admite que el decisor se encuentra en un estadio de conocimiento inicial o *a priori* sobre θ que ha de caracterizar mediante una distribución *a priori* para el mismo, $P(\theta | H)$, donde H engloba todo el conocimiento del decisor sobre el parámetro. Los expertos proporcionarán una información H' sobre el mismo parámetro en forma de distribución multivariante que indicará la región de valores que éstos consideran verosímil para θ . El decisor combinará ambos tipos de información para llegar a una cierta distribución para el parámetro *a posteriori* mediante:

$$P(\theta | H, H') \propto P(H' | H, \theta) \cdot P(\theta | H), \quad (41)$$

donde a la izquierda del símbolo de proporcionalidad se encuentra la distribución que el decisor atribuirá *a posteriori* al parámetro y el primer factor a la derecha de dicho símbolo es la verosimilitud de las opiniones proporcionadas por los expertos a los ojos del decisor. La verosimilitud es una pieza clave de esta fórmula ya que es a través de ella como el decisor modelará al experto,

eliminando sus sesgos si hubiere lugar a ello. Se remite al lector interesado al apéndice A en que se desarrolla extensamente la idea mostrada en este apartado de utilización de la fórmula de Bayes para combinar opiniones de expertos.

VI. El proyecto comunitario BE-EJT'S

VI. El proyecto comunitario BE-EJT'S

El proyecto "Benchmark Exercise on Expert Judgement Techniques in Level 2 PSA" (BE-EJTs), desarrollado en el marco del IV Programa sobre Seguridad en la Fisión de la Unión Europea, se desarrolló entre 1996 y 1998. Los objetivos globales de este proyecto fueron dos:

- Recopilar las diferentes metodologías y técnicas de juicio de expertos utilizadas en los países europeos en el ámbito del APS.
- Comparar la efectividad de cada una de dichas metodologías.

Para alcanzar estos objetivos el proyecto se estructuró en tres etapas cuyo desarrollo está solapado en el tiempo:

- Una fase previa para identificar metodologías y sus aplicaciones en los países de las instituciones participantes.
- Una fase 1 dedicada a comparar las metodologías participantes mediante su aplicación a la estimación de los parámetros físicos de interés de un experimento relacionado con la fenomenología de los accidentes severos.
- Una fase 2 dedicada también a la comparación de las metodologías, pero en este caso mediante su aplicación al desarrollo y cuantificación de una secuencia accidental relacionada con los accidentes severos.

En el proyecto participaron diez instituciones europeas de diferentes países, aunque con diversas aportaciones. Algunas instituciones aportaron, tanto metodología para realizar juicios de expertos, como expertos en fenomenología de los accidentes severos, mientras que otras aportaron tan sólo expertos, que han colaborado con las otras metodologías. Además, puesto que el protocolo NUREG-1150, descrito en el capítulo IV, se puede considerar como una metodología de referencia en el ámbito del APS, se consideró importante su participación en la fase 1 del proyecto a efectos de comparación de resultados, y es por ello que se subcontrató esta participación.

CSN y CTN-UPM participaron en este proyecto europeo a través de un acuerdo específico, cuyo objetivo era la adquisición de la experiencia necesaria en los procesos formales de juicio de expertos para la resolución de problemas en el ámbito de la seguridad nuclear y su transferencia al CSN. Como fruto de esta participación se ha diseñado un protocolo propio basado en la experiencia adquirida y en el protocolo del NUREG-1150.

VI.1. Resultados de la fase previa

Los resultados de la fase previa, contenidos en la referencia 5, se resumen en la siguiente tabla 6.1.

Tabla 6.1. El juicio de los expertos en el ámbito nuclear en diversos países europeos ¹⁵¹

Italia	Uso informal en el nivel 2 del APS (Proyecto ROAAM, Risk Oriented Accident Analysis Methodology).
Bélgica	Uso informal (documentado) en los niveles 1 y 2 del APS para la estimación de parámetros.
Reino Unido	Uso formal (metodología NNC) en el nivel 2 del APS de Sizewell B para evaluar y cuantificar APETs.
Finlandia	Uso formal (metodología STUK) en el nivel 1 del APS para realizar análisis de fiabilidad humana.
España	Uso informal (documentado) en los niveles 1 y 2 del APS para evaluar parámetros y formal (método Delphi) para la selección de emplazamientos de almacenamientos geológicos de residuos radiactivos (ENRESA).
Suiza	Uso informal (documentado) en el nivel 2 del APS para evaluar y cuantificar APETs.
Alemania	Uso formal (metodología GRS) para realizar análisis de incertidumbre relacionados con el APS.

Los datos más significativos a reseñar se refieren a los procedimientos formalizados de juicio de expertos diseñados en Finlandia y Alemania por VTT Automation y GRS (Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit) respectivamente. La metodología finlandesa está basada el protocolo NUREG-1150, pero con la diferencia de que utiliza técnicas de combinación bayesiana para realizar la agregación de las opiniones individuales. Este protocolo se ha aplicado a ámbitos tanto nucleares (nivel 1 del APS) como no nucleares (análisis de decisión). La metodología de GRS, que se ha aplicado en diversos análisis de incertidumbre relacionados con el APS, presenta como características fundamentales la utilización de grupos de expertos en lugar de expertos individuales y la profusión en el uso de las técnicas de descomposición.

VI.2. Resultados de la fase 1

En esta fase, se realizaron simultáneamente dos tareas. Por un lado se estudiaron los criterios de evaluación más adecuados para poder comparar las metodologías, y por otro se comenzó el proceso de comparación mediante la aplicación de cinco metodologías para predecir los resultados de un experimento relacionado con la fenomenología de los accidentes severos.

Los criterios de evaluación se seleccionaron atendiendo a las características deseables en todo procedimiento aplicable al APS en cuanto a calidad y auditabilidad. Tras diversas discusiones y propuestas se seleccionó un formato que contempla las llamadas *características internas* (características intrínsecas de la metodología, tabla 6.2) y *características externas*, tanto *generales* (dependen del esfuerzo requerido para aplicar la metodología, tabla 6.3) como *experimentales* (reflejan el grado de discrepancia entre las estimaciones obtenidas con la metodología y los resultados experimentales, tabla 6.4). Estas últimas características externas, las experimentales, también denominadas *scoring rules* o *reglas de puntuación* sólo son aplicables en aquellos casos en que la metodología de juicio de expertos se utiliza para predecir el valor de parámetros numéricos cuyo valor se conocerá *a posteriori* y la incertidumbre se expresa en forma de distribuciones de probabilidad.

Tabla 6.2. Características internas para evaluar las metodologías ¹⁵¹.

Característica	Descripción
Aplicabilidad	Capacidad de ser aplicada a un número suficientemente significativo de casos diferentes (en el ámbito del APS y fuera de él) sin modificaciones sustanciales.
Robustez	Capacidad para proporcionar resultados de calidad incluso en presencia de sesgos, falta de cooperación, recursos insuficientes, etc.
Auditabilidad	Capacidad para producir una representación explícita de la aplicación con el fin de permitir la inspección, certificación, diagnóstico y revisión.
Justificabilidad	Capacidad para proporcionar justificaciones explícitas de todas las conclusiones y resultados obtenidos.
Incrementalismo	Capacidad para producir resultados de más calidad conforme se dispone de mayores recursos.
Integración del conocimiento	Capacidad para integrar los conocimientos y opiniones de diferentes expertos.
Representación de la incertidumbre	Capacidad para producir una representación explícita de la incertidumbre expresada por los expertos.

Tabla 6.3. Características externas generales para evaluar las metodologías^[5].

Característica	Descripción
Facilidad de aprendizaje	Esfuerzo requerido de los analistas y expertos para comprender la metodología (estructura, organización, lenguaje, técnicas, ...).
Operabilidad	Esfuerzo requerido de los analistas para planificar la aplicación de la metodología.
Eficiencia normativa	Esfuerzo requerido de los analistas para aplicar la metodología (reuniones y trabajo individual).
Eficiencia Sustantiva	Esfuerzo requerido de los expertos para aplicar la metodología (reuniones y trabajo individual).
Eficiencia Total	Esfuerzo requerido de los analistas y expertos en reuniones para aplicar la metodología (se deriva de las dos anteriores).

Tabla 6.4. Características externas experimentales para evaluar las metodologías^[5].

Característica	Descripción
Índice de sorpresa	Fracción de resultados experimentales fuera del intervalo de incertidumbre 5%-95% (cuantiles) evaluado.
Desplazamiento de la mediana	Relación entre el número de resultados experimentales por encima y por debajo de la media de la distribución evaluada.

El experimento que se seleccionó para aplicar las metodologías corresponde a una serie que se realiza en la instalación experimental FARO (Fuel melt And Release Oven), ubicada en el Joint Research Centre de la Unión Europea (Ispra, Italia). En un experimento típico de esta instalación una gran cantidad de corium (UO_2/ZrO_2) se funde en un horno hasta los 3.000 °C y se libera posteriormente a una gran vasija con agua que puede estar a presiones de hasta 10 MPa y temperaturas de 300 °C. Así pues, esta serie de experimentos trata de simular accidentes con degradación del núcleo y pretende determinar, bajo una cierta variedad de condiciones, la generación de vapor asociada a la caída del fundido, la correspondiente carga térmica sobre las estructuras inferiores de la vasija y la configuración final de los escombros. El experimento L24 seleccionado corresponde a una presión en la vasija de 0.5 MPa. A los expertos se les pedía que estimasen los cuantiles 5%, 50% y 95% para las variables relacionadas con el experimento que aparecen en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Lista de variables relacionadas con el experimento FARO L24 ⁽⁵⁾.

Variable	Descripción
1	Presión máxima en la vasija en los tres primeros segundos.
2	Tiempo en alcanzarse la presión máxima anterior.
3	Presión en la vasija a los 15 segundos.
4	Presión máxima en la vasija a largo plazo (4a) y tiempo en alcanzarse (4b).
5	Porcentaje final de escombros fragmentados.
6	Diámetro medio final de los fragmentos de escombros.
7-8 (opcionales)	Temperaturas medias del agua y del vapor a los 5 segundos.
9-10 (opcionales)	Temperaturas medias del agua y del vapor a los 15 segundos.

Las metodologías que participaron en esta fase 1 fueron cinco, las mencionadas en la tabla 6.1, GRS (Alemania), NNC (Reino Unido) y STUK (Finlandia), más la metodología NUREG-1150 (Estados Unidos) y la metodología KEEJAM (Knowledge Engineering Expert Judgment Approach Methodology, Italia) con la que participó JRC-Ispira. La metodología NNC es un método informal de evaluación (no estructurado) basado en los procedimientos de garantía de calidad de la ingeniería británica que lleva el mismo nombre. Por su parte la metodología KEEJAM es un método altamente estructurado que representa los propios procesos de razonamiento de los expertos mediante la utilización de modelos lógicos adecuados.

El número total de expertos que participaron en una u otra metodología fue de 19, aunque los tres expertos proporcionados por NNC se consideraron como un único experto, ya que dicha metodología siempre proporciona una única opinión común. Todos los expertos visitaron la instalación experimental FARO antes de la aplicación de las metodologías y recibieron diversas explicaciones sobre su funcionamiento, así como de los resultados de experimentos precedentes. Tras finalizar esta visita se les pidió que diesen unas primeras estimaciones de los cuantiles 5%, 50% y 95% para las variables de la tabla 6.5 basándose solamente en la información y documentación recibida y algún que otro pequeño cálculo. Estas evaluaciones informales, denominadas de nivel 0, se solicitaron con el fin de contrastarlas posteriormente con las obtenidas tras la aplicación de las metodologías, con lo cual se puede estimar de algún modo y de forma global la bondad de los procesos formales de juicio de expertos.

La aplicación de las cinco metodologías al caso propuesto finalizó a principios del año 1997, con lo que se obtuvieron las estimaciones de nivel 1 (formales) de los expertos. Dos personas de CTN-UPM colaboraron en esta fase 1 dentro de la metodología NUREG-1150, una experta en fenomenología, Rosa Marina Bilbao, y un analista, Ricardo Bolado. La experta participó en todas las reuniones

de esa metodología, proporcionando sus estimaciones para las magnitudes de interés. Esta experta, alumna de doctorado realizando su tesis doctoral en el área estudiada, utilizó el código TEXAS 5. Asignó rangos de incertidumbres a una serie de parámetros y modelos inciertos, como la masa total de corium desplomado o la morfología del chorro de corium en la caída, realizando después simulaciones con el código mencionado. El analista colaboró con la experta facilitándole muestras para los parámetros y modelos inciertos y la asesoró en la asignación de rangos de incertidumbre para los mismos.

Tabla 6.6. Variación de las estimaciones de los expertos ⁽¹⁾.

Variable	Coeficiente de variación del cuantil 50% ⁽¹⁾		Longitud relativa media de los intervalos de incertidumbre ⁽²⁾	
	Estimaciones de nivel 0	Estimaciones agregadas	Estimaciones de nivel 0	Estimaciones agregadas
1	118.2	29.3	1.16	3.02
2	34.5	16.1	0.71	0.80
3	110.9	25.4	0.78	3.08
4 a	105.2	55.0	1.03	3.19
5	26.8	12.3	0.48	0.63
6	28.1	22.2	0.87	1.62

⁽¹⁾ $CV = 100 \sigma / \mu$, σ = desviación típica muestral, μ = media muestral.
⁽²⁾ Longitud relativa del intervalo de incertidumbre = $(x_{95} - x_5) / x_{50}$, donde x_5 , x_{50} y x_{95} son los cuantiles 5%, 50% y 95% respectivamente de las distribuciones evaluadas.

Con el fin de comparar cuantitativamente las estimaciones de nivel 0 con las estimaciones formales de las metodologías se han calculado los coeficientes de variación para el cuantil 50% y las longitudes relativas medias de los intervalos de incertidumbre para las seis variables que aparecen en la tabla 6.6.

Se puede observar que los mayores coeficientes de variación corresponden a las estimaciones relacionadas con la presión (variables 1, 3 y 4a). Además los cuantiles 50% para las cinco metodologías muestran menores coeficientes de variación que los correspondientes a las estimaciones de nivel-0, es decir, parece que las metodologías tienden a producir resultados más homogéneos que los expertos individuales. Esto puede ser debido a dos hechos: la agregación de las opiniones individuales que lleva a cabo cada metodología, que diluye de algún modo las posibles diferencias, y el propio proceso de pensamiento explícito y cuidadoso que provoca todo proceso formal de juicio de expertos, que induce a los expertos a comprender y analizar los problemas planteados desde un mismo punto de vista.

La longitud relativa media de los intervalos de incertidumbre refleja de modo claro la dificultad que entraña la predicción exacta de los resultados experimentales. De nuevo los mayores valores se dan en las estimaciones correspondientes a las variables de presión. Por el contrario, parece que las longitudes relativas de los intervalos de incertidumbre son mayores para las estimaciones agregadas de cada metodología que para las estimaciones de nivel 0. Probablemente, esto sea debido a la aplicación de técnicas para contrarrestar el sesgo de sobreconfianza, tan extendido entre los expertos. Puede darse también una componente debida a la dinámica general de los propios procesos estructurados, ya que muchas veces facilitan y buscan el intercambio de información entre los expertos, revelando diferentes apreciaciones, que llevan a cada experto a considerar fuentes de incertidumbre sobre el problema que se les plantea, no tenidas en cuenta previamente.

Las discrepancias entre los resultados experimentales disponibles y las estimaciones proporcionadas por la aplicación de las metodologías se muestran en la tabla 6.7. Los índices de sorpresas y los desplazamientos medios están calculados tanto para las estimaciones de nivel 0 como para las estimaciones finales agregadas proporcionadas por las metodologías. Los mayores valores del índice de sorpresas y del desplazamiento medio se producen para la variable 2 (tiempo hasta la presión máxima en los tres primeros segundos), lo cual puede indicar que los expertos encontraron en general difícil la estimación de esa variable. Obsérvese también que para todas las variables el índice de sorpresas de las evaluaciones finales es menor que para las estimaciones de nivel 0. Esto está relacionado con los mayores intervalos de incertidumbre que generaron, en general, las metodologías. Bolado e Ibañez ^[99] proporcionan un análisis un poco más detallado de los resultados obtenidos para los índices de sorpresas.

Tabla 6.7. Discrepancia entre los resultados experimentales y las estimaciones ⁽⁵⁾.

Variable	Número de estimaciones (1)		Número de sorpresas (2)		Índice de sorpresas (3)		Número de medias mayores que el valor experimental (4)		Desplazamiento medio (5)	
	Nivel 0	Agreg.	Nivel 0	Agreg.	Nivel 0	Agreg.	Nivel 0	Agreg.	Nivel 0	Agreg.
1	17	5	8	1	0.47	0.20	6	0	0.54	0.00
2	17	5	13	2	0.76	0.40	16	5	16.0	infinito
3	10	5	5	0	0.50	0.00	5	2	1.00	0.67
4a	13	5	5	0	0.38	0.00	5	1	0.63	0.25

(1) n ; (2) (n - n*) ; (3) (n - n*) / n ; (4) n> ; (5) n> / (n - n>).

El desplazamiento medio se puede interpretar como una medida del grado de “calibración” de los expertos o de las metodologías, ya que valores mayores que 1 corresponden a tendencias a sobreestimar el valor de las variables, mientras que valores menores que 1 corresponden a tendencias a subestimar dichos valores. Así pues, un experto “bien calibrado” debe producir un desplazamiento medio próximo a 1. Resulta curioso observar que para la variable 3 las estimaciones de nivel 0 están perfectamente calibradas, mientras que la aplicación de las metodologías proporciona todavía un buen valor pero ya no igual a 1.

VI.3. Resultados de la fase 2

Como ya se ha dicho, la fase 2 se dedicó a comparar las metodologías de juicio de expertos cuando se aplican al desarrollo y cuantificación de una secuencia accidental en el nivel 2 del APS. El escenario seleccionado se refiere a la combustión del hidrógeno en la contención de un reactor de agua a presión evolutivo genérico. En concreto, las cuestiones planteadas requieren la estimación de distribuciones de probabilidad para la probabilidad de deflagración/detonación del hidrógeno liberado a la contención tras un accidente severo con daño al núcleo y posterior reinundación del mismo tras la recuperación del suministro eléctrico exterior.

El planteamiento de la fase comenzó en el mes de abril de 1997 y concluyó al finalizar el proyecto. Las metodologías participantes fueron cuatro: NNC, STUK, KEEJAM y CTN-UPM/CSN ^[100]. Los apéndices C, D y E resumen la aplicación que los autores de este documento realizaron de la metodología CTN-UPM/CSN para resolver el problema planteado en esta fase del proyecto. La metodología se recoge en el apéndice B de este mismo documento.

VII. Conclusiones y recomendaciones

VII. Conclusiones y recomendaciones

Las siguientes conclusiones y recomendaciones están basadas en la experiencia adquirida tras la revisión bibliográfica y aplicación piloto realizadas por CTN-UPM en el marco del acuerdo específico suscrito con el CSN:

1. Los procesos estructurados de juicio de expertos son claramente útiles para caracterizar la incertidumbre asociada a problemas complejos de la seguridad nuclear, puesto que inducen un estudio riguroso y completo de los temas y evitan la sobreconfianza asociada a las opiniones informales y los juicios de ingeniero. Ahora bien, no se debe olvidar el hecho de que el juicio de expertos es un complemento, y no un sustituto, de las fuentes de información clásicas tales como los cálculos basados en principios fundamentales de la ciencia, la experimentación o la recopilación de datos. El juicio de expertos se puede utilizar para complementar los datos existentes o actualizar el estado del arte sobre un determinado tema, pero no es aceptable sustituir datos fáciles de obtener o cálculos científicos con juicio de expertos. No debe caer en el olvido la única razón para acudir a la opinión de los expertos: la existencia en el tema de interés de incertidumbres del conocimiento irreducibles o prácticamente irreducibles.
2. La realización de una aplicación de juicio de expertos supone un coste económico que puede ser considerable. Por lo tanto sólo se debe recurrir al juicio de expertos cuando el valor de los beneficios derivado del mismo puede superar al de los costes esperados. Las siguientes situaciones garantizan un alto beneficio en el uso del juicio de expertos:
 - Importancia de los temas. Un tema que podría recibir mucha atención por parte del organismo regulador o grupos interesados debería ser evaluado mediante juicio de expertos.
 - Complejidad de los temas. Los procesos formales de juicio de expertos permiten describir explícitamente los temas y los medios de análisis utilizados, con lo que se puede conseguir una alta coordinación en los procesos de grupo.
 - Nivel de documentación requerido. La documentación generada por un proceso formal de juicio de expertos es mucho más completa y consistente que la que se puede obtener de un proceso informal.
3. El protocolo NUREG-1150 se puede considerar como una metodología de referencia para la realización de aplicaciones de juicio de expertos, puesto que está ampliamente contrastada en un buen número de casos (nucleares y no nucleares). Cada etapa de este protocolo es importante y ninguna de ellas se puede omitir. Recientemente se ha desarrollado una nueva metodología, con un número de etapas similar al del protocolo NUREG-1150; esta

metodología TI/TFI identifica varios tipos de consenso y dedica una especial atención a la interacción entre los expertos. La aplicación de la misma en la estimación de la peligrosidad sísmica y los buenos resultados obtenidos han hecho que sea ampliamente reconocida y aceptada por la comunidad científica. Otras metodologías alternativas que se han propuesto hasta la fecha están basadas en gran medida en el protocolo NUREG-1150 y otras aproximaciones más innovadoras al problema de la incertidumbre, por ejemplo la ingeniería del conocimiento (metodología KEEJAM de la fase 1 del proyecto BE-EJTs), no parecen aunar mayores virtudes y sí en cambio mayores inconvenientes por diversos motivos.

4. El tiempo necesario para realizar una aplicación de juicio de expertos puede ser considerable. Las etapas que requieren más tiempo para su realización son aquellas en las que están involucrados los expertos. Con el fin de reducir las necesidades de tiempo se podría plantear un período máximo de dos meses para las anteriores actividades. Quizás el único medio para alcanzar este objetivo sea el aumento del coste de la aplicación, pero también sería muy importante utilizar procedimientos de dirección de proyecto para planear, programar y controlar el desarrollo de la aplicación. Así, el tiempo necesario para completar una aplicación de juicio de expertos podría estar entre cuatro y cinco meses dependiendo de factores tales como las características del problema a evaluar o el número de expertos o su procedencia.
5. Aunque se puede decir que el estado del arte actual sobre técnicas de juicio de expertos es suficiente como para garantizar unas evaluaciones de calidad, todavía existen aspectos que requieren una mayor atención, como por ejemplo:
 - El desarrollo de técnicas analíticas para evaluar el sesgo en las opiniones de los expertos. Con las técnicas actuales la reducción del sesgo es más un arte que una ciencia que requiere ser llevada a cabo por analistas muy experimentados.
 - El desarrollo de técnicas adecuadas para agregar de forma óptima las opiniones de los expertos. Hoy día este tema es un aspecto sobre el que no existen conclusiones definitivas, ni es probable que en el futuro próximo las haya. Las técnicas de agregación disponibles, tanto analíticas como de grupo, tienen ámbitos de validez limitados y excluyentes. Es por ello que quizás las estrategias mixtas en las que se pueden utilizar ambos tipos de técnicas en función de las necesidades de la aplicación sean las más adecuadas para obtener opiniones agregadas de la mejor calidad.
6. La realización de una aplicación de juicio de expertos es una tarea compleja que requiere disponer de participantes cualificados para obtener resultados de calidad, lo cual se refiere tanto al equipo de proyecto como a los expertos. La disponibilidad de expertos es un

tema muy importante, puesto que es improbable que los países pequeños puedan disponer de suficientes expertos cualificados para abordar con el suficiente nivel de detalle problemas complejos. Para evitar este problema las instituciones supranacionales interesadas, por ejemplo la Unión Europea, podrían establecer protocolos para facilitar la participación de expertos de diferentes países en aplicaciones individuales. Con respecto al equipo de proyecto, la experiencia de los analistas y el conocimiento de los generalistas son aspectos cruciales para el éxito de una aplicación de juicio de expertos. Además, puesto que no parece posible separar completamente la actividad de analista de la de generalista, en el ámbito nuclear parece conveniente disponer de analistas específicos con buenos conocimientos sobre temas de seguridad nuclear.

7. Como conclusión final hay que destacar que la participación de CTN/UPM en colaboración con el CSN en un proyecto comunitario ha dado entre otros frutos la adquisición de experiencia en la aplicación del Juicio de Expertos, así como la elaboración de un protocolo que permite aplicar estas técnicas en la resolución de temas complejos e importantes para la seguridad que estén sometidos a grandes incertidumbres.

Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

- [1] Rasmussen *et al.*, *Reactor Safety Study - An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, WASH-1400 (NUREG 75/014). Washington, October 1975.
- [2] R.M. Cranwell *et al.*, *Risk Methodology for Geologic Disposal of Radiactive Waste -Final Report*, Sandia National Laboratories, SAND81-2573 (NUREG/CR-2452). Washington, August 1987.
- [3] *Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1150. Washington, December 1990.
- [4] *A Review of NRC Staff Uses of Probabilistic Risk Assessment*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1489. Washington, March 1994.
- [5] G. Cojazzi *et al.*, *Benchmark Exercise on Expert Judgment Techniques in PSA Level 2*, Paper presented at the FISA'97 meeting on EU research on severe accidents, 17-19 November 1997. EUR Report 18258. Pages 468-480. Luxembourg, 1998.
- [6] G. Cojazzi, L. Pinola and R. Sardella, *A Benchmark Exercise on Expert Judgment Techniques in PSA Level 2: Design Criteria and General Framework*, Paper presented at the PSA'96 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment. Park City, Utah, September 29 - October 3, 1996.
- [7] E. J. Bonano, S.C. Hora, R.L. Keeney and D. von Winterfeldt, *Elicitation and Use of Expert Judgment in Performance Assessment for High-Level Radioactive Waste Repositories*, Sandia National Laboratories, SAND89-1821 (NUREG/CR-5411), May 1990.
- [8] R. P. Rechard, K.M. Trauth and R.V. Guzowski, *Quality Assurance Procedures for Parameter Selection and Use of Expert Judgment Panels Supporting Performance Assessments of the Waste Isolation Pilot Plant*, Sandia National Laboratories, SAND91-0429. May 1990.
- [9] 40 CFR 191: U.S. EPA *Environmental Standard for the Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel High-Level Waste and Transuranic Radioactive Wastes Final Rule*, U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Federal Register, Vol. 50, nº 182, pages 38066-38089, Washington D.C., 1985.

- [10] E. J. Bonano, and R. M. Cranwell, *Treatment of Uncertainties in the Performance Assessment of Geologic High Level Radioactive Waste Repositories*, **Mathematical Geology**, Vol. 20, N°.5 (1988), pages. 543-565.
- [11] *Staff's Approach for Dealing with Uncertainties in Implementing the EPA HLW Standards*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, SECY-91-242, August 1991.
- [12] Senior Seismic Hazard Analysis Committee. *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*. NUREG/CR-6372. LLNL. Washington, April 1997.
- [13] J.P. Kotra, M.P. Lee, N.A. Eisenberg and A.R. de Wispelare, *Branch Technical Position on the Use of Expert Elicitation in the High-Level Radioactive Waste Program*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1563. Washington, November 1996.
- [14] U.S. DOE, *Draft Environmental Assessment - Reference Repository Location. Hanford Site*, U.S. Department of Energy, DOE/RW-0017. 1984.
- [15] *Report to Rockwell Hanford Operations - Probability Encoding of Variables Affecting Inflow into the Exploratory Shaft Test Facility at the Basalt Waste Isolation Project*, Ridgeland, Washington, Golder Associates, June 1986.
- [16] U.S. DOE, *A Multiattribute Utility Analysis of Sites Nominated for Characterization for the First Radioactive-Waste Repository. A Decision Aiding Methodology*, U.S. Department of Energy: Office of Civilian Radioactive Waste Management, DOE/RQ-0074, Washington D.C., 1986.
- [17] R. Gregory, S. Lichtenstein, *A Review of the High-Level Nuclear Waste Repository Siting Analysis*, **Risk Analysis** 7, N°. 2 (1987), pgs. 219-223.
- [18] *Salt Repository Emplacement Mode Evaluation and Selection. Final Report*, Fluor Technology Inc., Advanced Technology Division, March 1988.
- [19] R.P. Rechard, H. Iuzzolino and J.S. Sandha . *Data Used in Preliminary Performance Assessment of the Waste Isolation Pilot Plant (1990)*. Sandia Report SAND89-2408. December 1990.
- [20] Sandia WIPP Project, *Preliminary Performance Assessment for the Waste Isolation Pilot Plant; Volume 3: Model Parameters*. Sandia Report SAND92-0700/3. December 1992.

-
- [21] K.M. Trauth, R.V. Guzowski and S.C. Hora, *A Formal expert Procedure for Performance Assessments of the Waste Isolation Pilot Plant*. Sandia report SAND93-2450. September 1994.
- [22] K.M. Trauth, S.C. Hora and R.P. Rechard, *Expert Judgment as Input to Waste Isolation Pilot Plant Performance Assessment Calculations. Probability Distributions of Significant System Parameters*, Sandia Report SAND91-0625. UC-72 1, February 1993.
- [23] K.M. Trauth, S.C. Hora, R.P. Rechard and D.R. Anderson, *The Use of Expert Judgment to Quantify Uncertainty in Solubility and Sorption Parameters for Waste Isolation Pilot Plant Performance Assessment*, Sandia National Laboratories, SAND92-0479. UC-72 1, December 1992.
- [24] R.V. Guzowski. *Preliminary Identification of Scenarios that May Affect the Escape and Transport of Radionuclides from the Waste Isolation Pilot Plant Southeastern New Mexico*, Sandia Report SAND89-7149. April 1990.
- [25] R.V. Guzowski, *Preliminary Identification of Scenarios for Waste Isolation Pilot Plant Southeastern New Mexico*, Sandia Report SAND90-7090. July 1991.
- [26] S.C. Hora, D. von Winterfeldt and K.M. Trauth, *Expert Judgment on Inadvertent Human Intrusion into the Waste Isolation Pilot Plant*, Sandia Report, SAND90-3063. UC-721, December 1991.
- [27] R.V. Guzowski and M.M. Gruebel (Editors), *Background Information Presented to the Expert Panel on Inadvertent Human Intrusion into the Waste Isolation Pilot Plant*. Sandia Report SAND91-0928. December 1991.
- [28] R. P. Rechard, K.M. Trauth, J.S. Rath, R.V. Guzowski, S.C. Hora and M.S. Tierney, *The Use of formal and Informal Expert Judgments When Interpreting Data for Performance assessments*. Sandia Report SAND92-1148. February 1993.
- [29] G.J. Dalrymple, *Defining Probability Density Functions*. Paper presented at the topical session of the fifth meeting of PSAC. Stockholm. 1987.
- [30] G. Dalrymple *et al.*, *Acquisition of Subjective Data for Use in Models for Waste Site Assessments (PACOMA Project). Final Report*, Principia Mechanica Ltd., PMI008/TR-STH/40, 1989.

- [31] T.J. Sumerling (Editor), *Dry Run 3. A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Wastes Based on Probabilistic Risk Analysis. Overview*. DOE Report N°: Doe/HMIP/RR 92.039. 1992.
- [32] T.J. Sumerling *et al.*, (Editors). *Dry Run 3. A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Wastes Based on Probabilistic Risk Analysis. Volume 1: The Factual Database*. DOE Report N°: Doe/HMIP/RR 92.041. 1992.
- [33] G.J. Dalrymple and M. Willows, *Dry Run 3. A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Wastes Based on Probabilistic Risk Analysis. Volume 4: Elicitation of Subjective Data*. DOE Report N°: Doe/HMIP/RR 92.043. 1992.
- [34] M.C. Thorne, *Dry Run 3. A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Wastes Based on Probabilistic Risk Analysis. Volume 8: Uncertainty and Bias Audit*. DOE Report N°: Doe/HMIP/RR 92.040. 1992.
- [35] OECD-NEA, *Expert Judgement of Human Reliability*, OECD Nuclear Energy Agency, CSNI Report N°. 88, January 1985.
- [36] *IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical Electronic Sensing Component and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations* IEEE Standard 500-1984, 1984.
- [37] *A Review of the Current Understanding of the Potential for Containment Failure from In-Vessel Steam Explosions*, U S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG- 1116, 1985 .
- [38] *Source Term Evaluation for Accident Conditions*, International Atomic Energy Agency, 1986.
- [39] *Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis. Dispersion and Deposition Uncertainty Assessment*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6244 (3 vols.), January 1995.
- [40] *Proceedings of the Second COSYMA Users Group Meeting, 19-21 June 1995. Budapest Hungary*, Kema Nuclear, 40666-NUC 95-5947, October 1995.
- [41] *Proceedings of the Combined 3rd COSYMA Users Group and 2nd International MACCS Users group Meeting, 16-19 September 1996. Portoroz Eslovenia*, Kema Nuclear, 41228-NUC 96-9238 (2 vols.), December 1996.

- [42] D.L. Bernreuter *et al.*, *Seismic Hazard Characterization of the Eastern United States*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR- 15 82 (5 vols .), 1980-83.
- [43] D.L. Bernreuter *et al.*, *Seismic Hazard Characterization of the Eastern United States*, Lawrence Livermore National Laboratory, UCID-2042 1(2 vols.), April 1985.
- [44] D.L. Bernreuter *et al.*, *Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Power Plant Sites East of the Rocky Mountains*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5250, January 1989.
- [45] *Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States*, Electric Power Research Institute, EPRI NP-4726 (10 vols.), July 1986.
- [46] D.L. Bernreuter *et al.*, *Seismic Hazard Characterization of the Eastern United States: Comparative Evaluation of the LLNL and EPRI Studies*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4885, May 1987.
- [47] H.J.C. Kouts *et al.*, *Special Committee Review of the Nuclear Regulatory Commission s Severe Accident Risks Report (NUREG-1150)*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1420, August 1990.
- [48] R.B. Corotis, R.R. Fox and J.C. Harris, *Delphi Methods: Theory and Design Load Application ASCE*, Vol. 107, N°. ST6, 1981:1095 1105.
- [49] M.G. Morgan, M. Henrion, *Uncertainty. A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, Cambridge University Press, 1990.
- [50] B. Sagar and P.W. Eslinger, *Use of Subjective Information in Probabilistic System Analysis*. Paper presented at the topical session of the fifth meeting of PSAC. Stockholm. 1987.
- [51] R.W. Barnard, M.L. Wilson, H.A. Dockery, J.H. Gauthier, P.G. Kaplan, R.R. Eaton, F.W. Bingham and T.H . Robey, *TSPA 1991: An Initial Total-System Performance Assessment for Yucca Mountain. Yucca Mountain Site Characterization Project*. Sandia report SAND9 1-2795. September 1992.
- [52] A. R. De Wispelare, L.T. Herren, M.P. Miklas and R.T. Clemen, *Expert Elicitation of Future Climate in the Yucca Mountain Vicinity. Iterative Performance assessment Phase 2. 5*. CNWRA 93016. August 1993.

- [53] K.M. Trauth, S.C. Hora and R.V. Guzowski, *Expert Judgment on Markers to Deter Inadvertent Human Intrusion into the Waste Isolation Pilot Plant*. Sandia Report SAND92-1382. November 1993.
- [54] S .R. Watson, *Procedures for the Elicitation of Expert Judgements in Ibe Probabilistic Risk Analysis for Radioactive Waste Repositories: an Overview* HMIP, PECD 71911637, December 1992.
- [55] A. Kolmogorov, *Foundations of the Theory of Probabilily*, Chelsea Publishing Co., 1956.
- [56] P.S. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, Dover, 1951.
- [57] R.Von Mises, *Probability, Statistics and Truth*, Macmillan Publishing Co., 1957.
- [58] T. Bayes, "Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances", *Biometrika*, 45, 1958: 293-315 (Reproducción del artículo de 1763).
- [59] F.P. Ramsey, "Truth and Probability", en *The Foundations of Mathematics and Other Logical Essays*, Kegan, 1926.
- [60] L.J. Savage, *The Foundations of Statistics*, Wiley, 1954.
- [61] I .J. Savage, *The Foundations of Statistical Inference*, Methuen, 1962.
- [62] D.V. Lindley, *Introduction to Probability and Slatistics from a Bayesian Viewpoint*, Cambridge University Press, 1965.
- [63] B. De Finetti, "Foresight: Its Logical Laws, Its Subjective Sources", en *Studies in Subjective Probabilily*, (H.E. Kyburg, H.E. Smokler, eds.), Wiley, 1964.
- [64] B. De Finetti, *Theory of Probability*, John Wiley & Sons, 1974.
- [65] *The Bayesian Approach to Probabilistic Risk Assessment*, Proceedings of the 10th Meeting of the PSAG, Madrid, 1990.
- [66] G.W. Parry, P.W. Winter, *The Characterization and Evaluation of Uncertainty in Probabilistic Risk Analisys*, SRD R190, UKAEA, October, 1980.

- [67] M.H. De Groot, *Modern Aspects on Probability and Utility*, Proceedings of the CII Course of the International School of Physics "Enrico Fermi" on Accelerated Life Testing and Expert Opinions on Reliability, North Holland, 1988.
- [68] B. De Finetti, *The True SP Problem (Subjective Probability Problem) Versus Various More or Less Related Side Problems*, Proceedings of a Research Conference on Subjective Probability and Related Fields, Psychological Institute of the University of Hamburg, April 1969.
- [69] J. Rohrbaugh, "Improving the Quality of Group Judgment: Social Judgment and the Delphi Technique", *Organizational Behavior and Human Performance*, 24, 1979: 73-92.
- [70] R.M. Hogarth, "Cognitive Processes and the Assessment of Subjective Probability Distributions", *JASA* Vol. 70, N°. 350, 1975: 271-294.
- [71] R.M. Hogarth, *Judgement and Choice: The Psychology of Decisions* John Wiley & Sons, 1980.
- [72] R.L. Winkler, "The Assessment of Prior Distributions in Bayesian Analysis", *American Statistical Association Journal*, September 1967: 776-800.
- [73] A. Tversky, D. Kahneman, P. Slovic (eds.), *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases*, Cambridge University press, 1982.
- [74] M.W. Merkhofer, "Quantifying Judgmental Uncertainty: Methodology, Experiences and Insights", *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, Vol. SMC- 17, N°. 5, 1987: 741-752.
- [75] J.E. Matheson, R.L. Winkler, "Scoring Rules for Probability Distributions", *Management Science*, Vol.22, N°. 10, 1975: 1087-1096.
- [76] M.H. De Groot, *Choosing Among Experts*, Proceedings of the CII Course of the International School of Physics "Enrico Fermi" on Accelerated Life Testing and Expert Opinions on Reliability, North Holland, 1988.
- [77] D.V. Lindley, Introduction. *Accelerated Life Testing and Experts Opinion in Reliability*, Proceedings of the CII Course of the International School of Physics "Enrico Fermi" on Accelerated Life Testing and Expert Opinions on Reliability, North Holland, 1988.

- [78] W.J. Roberds, *Methods for Developing Defensible Subjective Probability Assessments*, Golder Associates, Report 925-2036, September 1992.
- [79] J.M. Hampton, P.G. Moore, H. Thomas, "Subjective Probability and Its Measurement", *J.R Statist. Soc. A*, 136, Part 1, 1973: 21-42.
- [80] D.V. Lindley, A. Tversky, R.V. Brown, "On the Reconciliation of Probability Assessments", *J.R Statist. Soc. A*, 142, Part2, 1979:146-180.
- [81] R.E. Barlow, *Using Influence Diagrams*, Proceedings of the CII Course of the International School of Physics "Enrico Fermi" on Accelerated Life Testing and Expert Opinions on Reliability, North Holland, 1988.
- [82] J.B. Kadane, J.M. Dickey, R.L. Winkler, W.S. Smith, S.C. Peters, *Interactive Elicitation for a Normal Linear Model*, Technical Report 150, Department of Statistics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1978.
- [83] K. Chaloner, G.T. Duncan, "Some Properties of the Dirichlet-Multinomial Distribution and Its Use in Prior Elicitation", *Commun. Statist.-TheoryMeth.* 16(2), 1987: 511-523.
- [84] D.V. Gokhale, S.J. Press, "Assessment of a Prior Distribution for the Correlation Coefficient in Bivariate Normal Distribution", *JR. Statist. Soc. A*, 145, Part2, 1982: 237-249.
- [85] G. Apostolakis, A. Mosleh, V.M. Bier, "A Critique of Current Practice for the Use of Expert Opinions in Probabilistic Risk Assessment", *Reliability Engineering and System Safety*, 20 1988: 63-85.
- [86] R.L. Keeney, D. Von Winterfeld, "Elicity Probabilities from Experts in Complex Technical Problems". *IEEE Transactions on EngeneeringManagement*, 58 1991: 191-201.
- [87] R.T. Clemen, R.L. Winkler, "Limits for the Precision and Value of Information from Dependent Sources", *Operations Research*, 33, 1985: 427-442.
- [88] D.H. Gustafson, R.K. Shukla, A. Delbecq, G.W. Walster, *A Comparative Study of Ditrferences in Subjective Likelihood Estimates Made by Individuals Interacting Groups Delphi Groups and Nominal Groups*, *Organizational Behavior and Human Performance*, 9, 1973: 280-291.

- [89] G. Woo, *The Use of Expert Judgement in Risk Assessment*, Report DoE/HMIP/RR/92.058, 1992.
- [90] T.L. Saaty *Mathematical Methods of Operations Research*, Dover, 1988.
- [91] M.A. Meyer and A. Booker, *Eliciting and Analyzing Expert Judgement. A Practical Guide*, NUREG/CR-5424, LA- 11 667-MS, 1990.
- [92] R.M. Cooke, L.J.H. Goossens and B.C.P. Kraan, *Methods for CEC/USNRC Accident Consequence Uncertainty Analysis of Dispersion and Deposition*, EUR- 15 856EN, June 1994.
- [93] D.V. Lindley, *The Use of Probability Statements*, Proceedings of the CII Course of the International School of Physics “Enrico Fermi” on Accelerated Life Testing and Expert Opinions on Reliability, North Holland, 1988.
- [94] M.L. *et al.*, *Total System Performance Assessment for Yucca Mountain - SNL Second Iteration (TSPA)*, Sandia report SAND93-2675, 3 volumes. Albuquerque, 1993.
- [95] K.M. Thompson, M. Seguí Gómez and J.D. Graham, *Learning from the Past: Revisiting Expert Judgements Related to the Lifesaving Potential of Air Bags*, in Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM4, vol. 3, Springer Verlag, pages 2107-2112. 1998.
- [96] R. Bolado, A. Lantarón and J.A. Moya, *An Exercise on Bayesian Combination of Expert Judgement for Climatic Predictions at the Yucca Mountain Site*, Proceedings of the ESREL'96/PSAM-III Conferences, Vol 1, pages 505-510, Springer(1996).
- [97] S. Chhibber, G.E. Apostolakis and D. “Okrent, On the Use of Expert Judgments to Estimate the Pressure Increment in the Sequoyah Containment at Vessel Breach”, *Nuclear Technology*, Vol 105, 1994. Pages: 87-103.
- [98] J. Ibáñez y R. Bolado, “Evaluación de la combustión del hidrógeno en un reactor PWR evolutivo genérico mediante juicio de expertos”. Informe técnico de la Cátedra de Tecnología Nuclear CT N19/98. Madrid, julio 1998.
- [99] R. Bolado y J . Ibáñez, *El proyecto comunitario BE-EJTs sobre técnicas de Juicio de Expertos y la participación de CSN/CTN-UPM*. II Jornada sobre resultados del Plan de Investigación del CSN. Madrid, 10 de diciembre de 1997. Páginas 127-150. Madrid, 1998.

- [100] J. Ibáñez, R. Bolado, *Propuesta de Protocolo para Evaluar la Incertidumbre en Parámetros Numéricos mediante el Juicio de Expertos*, Cátedra de Tecnología Nuclear, Universidad Politécnica de Madrid, Informe Técnico CTN-15/97, mayo 1997.

Apéndices

A. La combinación bayesiana del Juicio de Expertos

Introducción

La inferencia bayesiana parte de considerar a un decisor N que toma las opiniones de m expertos S_i , $i = 1, \dots, m$; para combinarlas según la fórmula de Bayes con sus creencias *a priori* sobre los sucesos o parámetros de interés, obteniendo finalmente un estado de conocimiento u opinión *a posteriori* sobre ellos. Las ideas y los planteamientos para abordar la combinación bayesiana del juicio de expertos que se plasman en este apéndice son esencialmente debidas a Lindley ^[1] y Clemen y Winkler ^[2]. A continuación se distinguirá entre distribuciones discretas y continuas y se dedicará una sección al tema fundamental de la correlación entre expertos, que tiene importantes implicaciones en ambos casos.

A.1. Distribuciones discretas

En general se dispondrá de m expertos que tienen que evaluar una distribución de probabilidad para la partición $\{A_j\}$, $j = 1, \dots, n$. Conviene comenzar por el caso más sencillo en que existe un decisor N , un único experto S_1 y dos sucesos $\{A_1, A_2\}$ por lo intuitivo y clarificador que resulta. Posteriormente se tratará el caso general de varios expertos y varios sucesos.

Un experto y dos sucesos

Dado que en este caso A_1 y A_2 son necesariamente complementarios se les denominará A y \bar{A} respectivamente. El decisor N tiene un conocimiento previo H sobre estos dos sucesos, lo que le permite establecer una probabilidad *a priori* $P(A/H)$. Por su parte S_1 aporta su opinión sobre A en forma de probabilidad: $P_1(A/H_1)$, donde H_1 son los conocimientos previos del experto. La aplicación de la fórmula de Bayes proporciona la expresión:

$$P(A/H, P_1(A/H_1)) = \frac{P(P_1(A/H_1)|A, H) \cdot P(A/H)}{P(P_1(A/H_1)|A, H) \cdot P(A/H) + P(P_1(A/H_1)|\bar{A}, H) \cdot P(\bar{A}/H)}. \quad (\text{A.1})$$

Haciendo caso omiso del factor de proporcionalidad (el denominador de la anterior expresión), que garantiza que el miembro de la izquierda sea efectivamente una probabilidad, y abreviando la nomenclatura mediante $P_1 = P_1(A/H_1)$ se tiene que:

$$P(A/H, P_1) \propto P(P_1/A, H) \cdot P(A/H). \quad (\text{A.2})$$

Como se sabe, esta expresión indica que la probabilidad *a posteriori* que atribuye el decisor N al suceso A es proporcional a su opinión *a priori*, $P(A/H)$, y a la probabilidad que asigne al hecho de

que el experto S_j asigne probabilidad P_j al suceso cuando éste efectivamente se da, $P(P_j/A, H)$. Esta última probabilidad se denomina verosimilitud de P_j dada la ocurrencia de A .

Análoga a la expresión (A.2) existe otra expresión para \bar{A} . El cociente de estas dos expresiones será:

$$\frac{P(A/H, P_j)}{P(\bar{A}/H, P_j)} = \frac{P(P_j/A, H)}{P(P_j/\bar{A}, H)} \cdot \frac{P(A/H)}{P(\bar{A}/H)}, \quad (A.3)$$

que tomando logaritmos neperianos queda:

$$\log(A/H, P_j) = \text{Ln} \frac{P(P_j/A, H)}{P(P_j/\bar{A}, H)} + \log(A/H), \quad (A.4)$$

donde,

$$\log(A/H, P_j) = \text{Ln} \frac{P(A/H, P_j)}{P(\bar{A}/H, P_j)} \quad \text{y} \quad \log(A/H) = \text{Ln} \frac{P(A/H)}{P(\bar{A}/H)} \quad (A.5)$$

son los log-odds de las probabilidades $P(A/H, P_j)$ y $P(\bar{A}/H, P_j)$. Obsérvese que estos log-odds no están definidos en forma de logaritmos decimales, tal y como se hizo en el capítulo IV de este documento, sino en forma de logaritmos neperianos, lo cual es más adecuado para el estudio que a continuación se describe.

Así pues, la teoría de inferencia bayesiana indica que N debe utilizar la expresión (A.4) para actualizar su opinión sobre el suceso A cuando recibe la opinión de S_j sobre el mismo suceso. Para entender totalmente esta expresión hay que comentar el primer término del segundo miembro. Este término,

$$\text{Ln} \frac{P(P_j(A/H_1)/A, H)}{P(P_j(A/H_1)/\bar{A}, H)}, \quad (A.6)$$

no es de la misma naturaleza que los log-odds, ya que no es el logaritmo del cociente entre las probabilidades de un suceso y su complementario, sino que las probabilidades consideradas son para la misma cantidad, $P_j(A/H_1)$, condicionada por diferentes sucesos, A en un caso y \bar{A} en otro. Esto es el logaritmo del cociente de verosimilitudes para P_j dados A y \bar{A} respectivamente que, como se verá a continuación, representa la magnitud del cambio que la opinión de S_j produce en la probabilidad que N atribuye al suceso A (e implícitamente al suceso \bar{A}).

Obsérvese que si N considera a S_j un buen experto esperará con alta probabilidad que S_j atribuya alta probabilidad al suceso A cuando efectivamente A se dé, es decir, $P(P_j(A/H_1)/A, H)$ será grande para grandes valores de $P_j(A/H_1)$. Igualmente, N creará poco probable que S_j atribuya

alta probabilidad al suceso A cuando se dé \bar{A} , por lo que $P(P_1(A/H_1)/\bar{A}, H)$ será pequeña para grandes valores de $P_1(A/H_1)$. Por ello el cociente de ambas expresiones será mayor que 1 y la expresión (A.6) será mayor que 0. En este caso la expresión (A.4) garantiza que N modifica su opinión en el sentido que indica la opinión de S_1 . En el caso opuesto, si N considerase que S_1 es un mal experto y creyera que su opinión, la de S_1 , no se ve influida por el hecho de que se dé A o \bar{A} , atribuirá aproximadamente igual probabilidad a $P_1(A/H_1)$ tanto si se da A como si no se da, por lo que de nuevo (A.4) garantiza que la opinión de N no se verá modificada en absoluto por la opinión de S_1 . Por tanto, el logaritmo del cociente de las verosimilitudes da una medida de la opinión que N tiene sobre la calidad de S_1 como experto.

Habida cuenta que los log-odds toman valores en el intervalo $(-\infty, +\infty)$ puede hacerse una transformación con las probabilidades que S_1 atribuye al suceso A de la forma:

$$q_1 = \text{Ln} \frac{P_1(A/H_1)}{P_1(\bar{A}/H_1)} = \text{Ln} \frac{P_1(A/H_1)}{1 - P_1(A/H_1)}, \quad (\text{A.7})$$

que es biunívoca y presenta la ventaja de que q_1 toma valores en el intervalo mencionado, lo que amplía las posibilidades de manipulación de la ecuación (A.4). Con esta transformación dicha ecuación pasa a escribirse:

$$\text{lo}(A/H, q_1) = \text{Ln} \frac{P(q_1/A, H)}{P(q_1/\bar{A}, H)} + \text{lo}(A/H). \quad (\text{A.8})$$

Si N atribuye leyes gaussianas a $P(q_1/A, H)$ y $P(q_1/\bar{A}, H)$ se obtiene un interesante caso de análisis y una simplificación desde el punto de vista operativo. Por lo tanto considérense las siguientes distribuciones para dichas probabilidades:

$$P(q_1/A, H) \sim N(\mu_1, \sigma^2) \quad (\text{A.9})$$

$$P(q_1/\bar{A}, H) \sim N(\mu_0, \sigma^2),$$

que indica que la primera magnitud sigue una ley gaussiana de media μ_1 y varianza σ^2 y la segunda igual tipo de ley con media μ_0 y la misma varianza σ^2 . Los subíndices 1 y 0 indican respectivamente que A se da o que no se da. En estas condiciones, unas sencillas operaciones permiten transformar la expresión (A.8) en la nueva expresión:

$$\text{lo}(A/H, q_1) = \left(\frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \right) \cdot \left(q_1 - \frac{\mu_1 + \mu_0}{2} \right) + \text{lo}(A/H). \quad (\text{A.10})$$

Antes de poder interpretar esta expresión es necesario comentar el significado de las distribuciones asignadas mediante la expresión (A.9). Ante todo obsérvese que un valor positivo de q_1

indica que S_I considera más probable A que \bar{A} , ya que $q_I > 0$ supone que $P_I(A/H_I) > 0.5$ como se puede comprobar al examinar la expresión (A.7). La primera fórmula de la expresión (A.9) indica que N cree que S_I atribuirá valores de q_I en torno a μ_I para el suceso A cuando éste efectivamente se dé. La explicación para la segunda expresión es análoga salvo que en este caso el suceso condicionante es \bar{A} . La varianza σ^2 , que se ha supuesto igual en ambos casos, da una idea de la opinión de N sobre la dispersión que puede tener la predicción realizada por S_I .

Un buen experto a los ojos de N será aquel que atribuya alta probabilidad, desde luego superior a $1/2$, a un suceso cuando éste se dé, μ_I grande y positivo, y baja probabilidad, como mucho $1/2$, al suceso A cuando se dé \bar{A} , μ_0 grande y negativo, y en ambos casos, a ser posible, con baja dispersión, σ^2 pequeña. El caso $\mu_I = -\mu_0$ es el llamado *caso simétrico*, que indica que el experto es tan bueno prediciendo A cuando se da A como prediciendo \bar{A} cuando se da \bar{A} , lo cual no tiene por qué ser cierto siempre.

La expresión (A.10) indica que N primero corrige la información aportada por S_I mediante un *término de sesgo*, $(\mu_I + \mu_0)/2$, y después multiplica el resultado por un factor $(\mu_I - \mu_0)/\sigma^2$. El valor resultante se añade al log-odd de su probabilidad *a priori*. Respecto al factor multiplicativo pueden considerarse tres casos:

$$\frac{(\mu_I - \mu_0)}{\sigma^2} > 1, \quad \frac{(\mu_I - \mu_0)}{\sigma^2} = 1, \quad \frac{(\mu_I - \mu_0)}{\sigma^2} < 1. \quad (\text{A.11})$$

El primero de los casos supone que N aumentaría el efecto de la opinión de S_I sobre su opinión *a priori*, en el segundo caso consideraría estrictamente su efecto y en el tercero se disminuiría dicho efecto.

Dos últimas notas a este apartado. Si N no tuviera opinión significativa sobre el suceso A , y eventualmente confiase en el criterio de S_I , se estaría ante el caso en que $P(A/H) = P(\bar{A}/H) = 1/2$, por lo que $lo(A/H) = 0$. Creer a S_I implica no concederle *sesgo*, $\mu_I + \mu_0 = 0$, y considerar $\mu_I - \mu_0/\sigma^2 = 1$, con lo que (A.10) asegura que la opinión *a posteriori* de N sería la opinión de S_I . Finalmente, un experto ideal para predecir los sucesos de interés sería aquel que atribuyese sin posible variabilidad, $\sigma^2 = 0$, probabilidad 1 a A cuando este suceso se da, $\mu_I = +\infty$, y probabilidad 0 a A cuando se da \bar{A} , $\mu_0 = -\infty$. En este caso está claro que, *a posteriori*, N atribuiría probabilidad 1 ó 0 a A según se diese A o \bar{A} , no teniendo posibilidad de error. Este caso tiene en común con el anterior que llevaría a N a adoptar la misma opinión que S_I .

Cabe mencionar que el análisis realizado es sensible a la forma de la distribución que N asigne a las verosimilitudes ⁽¹⁾, y en el caso general no siempre se llega a resultados tan intuitivos como los obtenidos para la distribución normal. Esto no resta en modo alguno validez a lo descrito ni a la hipótesis de normalidad que, en principio, no hay motivo alguno para descartarla en muchas situaciones reales.

Varios expertos y dos sucesos

En este caso se dispone de los expertos S_1, S_2, \dots, S_m que emitirán juicios sobre un suceso A y su complementario \bar{A} . En concreto, el experto S_i asignará al suceso A una probabilidad $P_i(A/H_i)$, que al igual que en el apartado anterior se podrá transformar para expresarse en forma de log-odd:

$$q_i = \text{Ln} \frac{P_i(A/H_i)}{1 - P_i(A/H_i)}. \quad (\text{A.12})$$

Por tanto, de las sesiones de objetivación del juicio de expertos se obtendrá un vector $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ que, de acuerdo con la fórmula de Bayes, repercutirá sobre la opinión que tiene N sobre A del modo siguiente:

$$\text{lo}(A/H, \vec{q}) = \text{Ln} \frac{P(\vec{q}/A, H)}{P(\vec{q}/\bar{A}, H)} + \text{lo}(A/H), \quad (\text{A.13})$$

donde el primer sumando del segundo miembro es de nuevo el logaritmo neperiano de un cociente entre verosimilitudes, que involucra a las distribuciones conjuntas que N asigna al vector \vec{q} cuando se da A y cuando se da \bar{A} . Estas distribuciones conjuntas necesariamente incluirán la opinión de N sobre la correlación entre cada par de expertos en lo referente a los sucesos A y \bar{A} . Es beneficioso y común tomar de nuevo distribuciones normales multivariantes para $P(\vec{q}/A, H)$ y $P(\vec{q}/\bar{A}, H)$; sean éstas

$$P(\vec{q}/A, H) \sim N_m(\mu_1, \Sigma) \quad (\text{A.14})$$

$$P(\vec{q}/\bar{A}, H) \sim N_m(\mu_0, \Sigma),$$

donde N_m indica distribución normal m -dimensional, μ_1 y μ_0 son los vectores de medias dados A y \bar{A} respectivamente y Σ es la matriz de varianzas y covarianzas. La aplicación de la fórmula de Bayes lleva a:

$$\text{lo}(A/H, \vec{q}) = \left(\vec{q} - \frac{\mu_1 + \mu_0}{2} \right)^T \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_0) + \text{lo}(A/H), \quad (\text{A.15})$$

donde de nuevo se efectúa corrección por sesgo, $(\mu_1 + \mu_0)/2$ y se multiplica por el factor $\Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_0)$. En este punto aparece un fenómeno en cierto modo desalentador, que es la aparición de términos de covarianza en Σ , es decir, que podrá existir correlación entre los expertos. Un modo posible de abordar este problema es modelar explícitamente las relaciones entre los conocimientos H_i y H_j de cada dos expertos S_i y S_j . Desde luego considerar la correlación entre expertos no es algo superfluo, ya que se trata de abordar el problema de qué hacer cuando se da dos veces la mis-

ma información o, en general, información con diferentes grados de solapamiento. Más adelante, en el apartado A.3, se podrán ver algunos efectos de la correlación entre expertos.

Varios expertos y más de dos sucesos

Este es el caso más general en que se dispone de un conjunto de expertos S_1, S_2, \dots, S_m que aportarán sus respectivas opiniones sobre un conjunto de sucesos mutuamente excluyentes A_1, A_2, \dots, A_n . Podrá verse que en esta situación se multiplica el número de parámetros que tendrá que evaluar el decisor N .

Cada experto S_i suministrará una probabilidad para cada suceso A_j ,

$$P(A_j / H_i) \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (\text{A.16})$$

que por comodidad de cálculo llamaremos y transformaremos de la manera

$$P_{ij} = P_i(A_j / H_i), \quad q_{ij} = \text{Ln}(P_{ij}), \quad (\text{A.17})$$

de modo que a partir de ahora se trabajará con la matriz Q de los logaritmos de las probabilidades que cada experto S_i asigna a cada suceso A_j . Considerando el suceso A_k y tomando logaritmos en la fórmula de Bayes se llega a:

$$\text{Ln}P(A_k / Q, H) = h + \text{Ln}[P(Q / A_k, H) \cdot P(A_k / H)] \quad (\text{A.18})$$

donde h es una constante. Obsérvese que $P(A_k / Q, H)$ es una distribución multivariante en un espacio de dimensión $m \cdot n$ que da la probabilidad actualizada que N atribuirá a A_k cuando cada S_i haya atribuido a cada A_j una probabilidad cuyo logaritmo neperiano es q_{ij} . Además, hay n expresiones similares a ésta, una para cada uno de los sucesos de la partición estudiada (cada posible valor del índice k). Es conveniente de nuevo recurrir a la hipótesis operacionalmente ventajosa y verosímil de normalidad, que consiste en suponer que N admite que cada q_{ij} adopta una distribución normal en un espacio de dimensión $m \cdot n$ con medias:

$$E(q_{ij} / A_k, H) = \mu_{ijk}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (\text{A.19})$$

y con matriz de varianzas y covarianzas

$$\text{cov}(q_{ij}, q_{kl} / A_s, H) = \sigma_{ijkl}, \quad \forall i, k = 1, 2, \dots, m; \quad j, l = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.20})$$

La expresión (A.19) indica que N considera que el valor más probable que S_i atribuirá al logaritmo de la probabilidad de A_j cuando se produzca realmente A_k será μ_{ijk} . La expresión (A.20) da

cuenta de la idea que tiene N sobre la correlación entre las opiniones de S_i sobre A_j y de S_k sobre A_l cualquiera que sea el suceso que realmente se dé (A_s es un suceso genérico que, como se deduce de la expresión (A.20), no repercute sobre el valor de la covarianza de q_{ij} y q_{kl} , por lo que s no es índice de σ); se ha hecho por tanto la hipótesis simplificadora adicional de suponer la correlación independiente del suceso condicionante. Los casos en que $j = l$ denotan covarianza entre S_i y S_k al opinar sobre el mismo suceso, y aquellos en que $j = l$ y además $i = k$ indican la varianza que atribuye N a S_i al opinar éste sobre A_j . Con estas dos hipótesis, la de normalidad y la de no influencia del suceso condicionante en la covariación, la ecuación de la expresión (A.18) se transforma en:

$$\text{Ln}P(A_s / Q, H) = h + \sum_{i,j} \beta_{ijs} q_{ij} + \alpha_s + \text{Ln}P(A_s / H) \tag{A.21}$$

donde

$$\beta_{ijs} = \sum_{k,l} \sigma^{ijkl} \mu_{kls}, \quad \alpha_s = \frac{1}{2} \sum_{ijkl} \mu_{ijs} \sigma^{ijkl} \mu_{kls} \tag{A.22}$$

Los σ^{ijkl} son los componentes de la matriz inversa de la matriz de varianzas y covarianzas, y se han absorbido en la constante h todos los términos de segundo orden en q por no depender de A_s . Obsérvese que vuelve a tenerse transformación lineal de opiniones, pero en este caso en términos de logaritmos de probabilidades en vez de log-odds.

A todo este desarrollo se le pueden hacer dos objeciones fundamentales. La primera es que la aproximación normal adoptada no sería aplicable estrictamente hablando, pues los valores de los q_{ij} no se distribuyen sobre todo el eje real, sólo sobre el intervalo $[-\infty, 0]$. Además, dado que se han de cumplir las m restricciones $\sum_j P_{ij} = 1$ es decir, (cada experto ha de asignar un conjunto de probabilidades a los sucesos de la partición que sumen uno), los q_{ij} no son independientes. Sin embargo Lindley ⁽¹⁾ demuestra, a través del concepto de *contraste*, que para una elección adecuada del tensor de medias, cuyas componentes son las μ_{ijk} , esto es irrelevante y la hipótesis de normalidad funciona. El segundo inconveniente viene dado por el hecho de que en esta aproximación N ha de evaluar, para construir su verosimilitud $P(Q/A_k, H)$ para todo k , $m \cdot n^2$ medias y $m \cdot n \cdot (m \cdot n + 1) / 2$ varianzas y covarianzas. Incluso para m y n mínimos, 2 y 3 respectivamente, esto es desproporcionado: 18 medias y 21 varianzas y covarianzas. Debido a esto es usual hacer las siguientes hipótesis simplificadoras:

1. N considera que en la evaluación que el experto S_i hace del suceso A_j sólo influye que éste se dé o que no se dé, es decir, los μ_{ijk} para cada par (i, j) , quedan reducidos a los dos casos $j = k$ y $j \neq k$, y además considera que S_i es igualmente bueno prediciendo cada A_j , con lo cual queda:

$$\mu_{ijk} = \begin{cases} \mu_{i1} & j = k \\ \mu_{i0} & j \neq k \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

2. N considera que la correlación entre cada pareja de expertos S_i y S_j depende únicamente de si están calculando la probabilidad de un mismo suceso o de otro distinto, y que la misma es independientemente de cuál sea éste, es decir, σ_{ijkl} tomará sólo dos posibles valores: σ_{ikl} cuando $j = l$ y σ_{ij0} cuando $j \neq l$.

Con estas hipótesis el número de medias que ha de evaluar N queda reducido a $2m$ y el de varianzas y covarianzas a $m \cdot (m+1)/2$, que en el caso mínimo son 4 medias y 3 varianzas y covarianzas. Tras un poco de cálculo, y teniendo en cuenta estas hipótesis, se llega a la expresión

$$\text{Ln}[P(A_s / Q, H)] = h - n \sum_i \beta_i q_{is} + \text{Ln}[P(A_s / H)], \quad (\text{A.24})$$

donde:

$$\beta_i = \sum_k \mu_{k0} (\sigma^{ik1} - \sigma^{ik0}). \quad (\text{A.25})$$

A.2. Distribuciones continuas

Hasta ahora se ha tratado el problema de cómo combinar estimaciones que dan varios expertos de probabilidades de una serie de sucesos de interés. El caso que se aborda ahora es diferente. En vez de sucesos se consideran parámetros, los cuales pueden tomar valores en un cierto rango. Se supone que cada experto, según sus conocimientos, considera más verosímil que el verdadero valor del parámetro se encuentre en unas regiones que en otras del mencionado rango. Cada experto caracteriza su incertidumbre sobre el parámetro mediante una función de densidad de probabilidad. Se trata ahora de ver posibles modos de combinar las distribuciones propuestas por los expertos, de modo que se obtenga una única distribución que compendie todo su conocimiento.

Caso en que los expertos proporcionan una medida centralizadora y otra de dispersión

En algunas ocasiones el experto no se siente capaz de dar una distribución completa del parámetro desconocido y se limita a dar una medida de centralización y otra de dispersión (una media y una desviación típica o una mediana y un rango intercuartílico), y además está de acuerdo con que su medida de incertidumbre sobre el parámetro se parece a una ley típica como una normal o una uniforme. En estos casos en que el parámetro que se desea estimar

puede tomar valores en un continuo y se dispone de un experto, S , que suministra un par de valores (m, s) para caracterizar la incertidumbre sobre θ , la fórmula de Bayes indica que N ha de modificar su opinión sobre θ del modo:

$$P(\theta / m, s) \propto P(m, s / \theta) \cdot P(\theta), \tag{A.26}$$

donde $P(\theta)$ es la distribución *a priori* de N sobre el parámetro θ , $P(m, s / \theta)$, es la verosimilitud que N genera para cada par de valores (m, s) proporcionados por S , y $P(\theta / m, s)$ es la distribución *a posteriori* de N para θ después de procesar la información dada por S . Se ha omitido por razones de comodidad la referencia a H , el conocimiento *a priori* de N sobre θ . Es lícito pensar que en general la información se concentrará en m , ya que este dato indica en torno a qué valor cree S que se puede encontrar θ con mayor credibilidad (la excepción a esto son aquellos casos extremos en que s es muy grande y por tanto ni m ni s aportan gran información). Por lo tanto se puede hacer la hipótesis general de que $P(s / \theta)$ no depende de θ , por lo que, al ser $P(m, s / \theta) = P(m / s, \theta) \cdot P(s / \theta)$, se puede incluir $P(s / \theta)$ en la constante de proporcionalidad de la fórmula de Bayes, de modo que la expresión (A.26) se convierte en:

$$P(\theta / m, s) \propto P(m / s, \theta) \cdot P(\theta) \tag{A.27}$$

En este caso, la hipótesis realista más simple sigue siendo la de normalidad para la verosimilitud $P(m / s, \theta)$, con media $\alpha + \beta\theta$ y desviación típica γs , donde α y β pueden ser cualesquiera y γ ha de ser positivo. La terna (α, β, γ) permite controlar con sencillez la opinión que tiene N sobre S . En concreto α y β permiten a N modelar el sesgo con que cree que S estima θ . Y a través de γ el decisor modela la capacidad de S para evaluar adecuadamente su propia incertidumbre sobre el parámetro que se pretende estimar. Así, si N asignase al experto valores $\alpha = 1$, $\beta = 1.1$ y $\gamma = 0.85$ indicaría que piensa que dicho experto tiende a sobreestimar el valor de θ en una unidad más un 10% del verdadero valor del parámetro. Además, N consideraría que el experto tiende a sobreestimar su propia incertidumbre sobre θ en aproximadamente un 15%. Con la hipótesis recién expresada sobre el modelado de los sesgos del experto por el decisor, la expresión (A.27) para la distribución *a posteriori* queda de la forma:

$$P(\theta / m, s) \propto e^{-\frac{(m - \alpha - \beta \cdot \theta)^2}{2\gamma^2 s^2}} \cdot P(\theta), \tag{A.28}$$

que, en el caso de poder adoptar una distribución *a priori* normal, será también normal. Ahora bien, dado que lo que interesa en la distribución *a posteriori* es ver en torno a qué valores es verosímil encontrar el verdadero valor θ , y haciendo la hipótesis de una distribución *a priori* no informativa, $P(\theta)$ esencialmente constante en el intervalo $((m - \alpha) / \beta \pm 3\gamma s / \beta)$, es decir, el decisor no tiene una opinión clara sobre θ , se llega a la siguiente expresión para la distribución *a posteriori*:

$$P(\theta / m, s) \propto e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - (m - \alpha) / \beta}{\gamma / \beta} \right)^2}, \tag{A.29}$$

que no es sino una normal de media $(m - \alpha) / \beta$ y desviación típica γ / β .

Este desarrollo se puede generalizar fácilmente al caso de m expertos si se hacen dos hipótesis similares a las anteriores, la de no aportación de información de s sobre θ y la de normalidad:

1. $P(s_1, s_2, \dots, s_m / \theta) \equiv P(\bar{s} / \theta)$ no depende de θ .
2. $P(m_1, m_2, \dots, m_m / \bar{s}, \theta) \equiv P(\bar{m} / \bar{s}, \theta)$ es una normal m -dimensional de medias $\alpha_i + \beta_i \theta$, desviaciones típicas $\sigma_{ii} = \gamma_i s_i$ y covarianzas $\sigma_{ij} = \rho_{ij} \gamma_i s_i \gamma_j s_j$.

Con estas hipótesis, y considerando una distribución *a priori* no informativa, la fórmula de Bayes proporciona la siguiente expresión para la distribución *a posteriori*:

$$P(\theta / \bar{m}, \bar{s}) \propto e^{-\frac{1}{2} \{(\bar{m} - (\alpha + \beta \theta))^T \Sigma^{-1} (\bar{m} - (\alpha + \beta \theta))\}}, \tag{A.30}$$

equivalente a:

$$P(\theta / \bar{m}, \bar{s}) \propto e^{-\frac{1}{2} \{(\theta - m') / \sigma'\}^2}, \tag{A.31}$$

donde m' y σ' son respectivamente la media y la desviación típica de la distribución que, *a posteriori*, N asignará a θ y cuyos valores son:

$$m' = (\beta^T \Sigma^{-1} (\bar{m} - \alpha)) (\sigma')^{-1}, \tag{A.32}$$

$$(\sigma')^{-1} = (\beta^T \Sigma^{-1} \beta)^{1/2}.$$

Al igual que en el caso de un experto los vectores, $\vec{\alpha}$, $\vec{\beta}$ y $\vec{\gamma}$ permiten a N modelar la opinión que tiene de cada experto. Esto supone que N tenga que decidirse y dar valores a esos vectores para poder construir la función de verosimilitud. Esta situación puede resultar incómoda para N . Quizá N podría sentirse más cómodo proporcionando las medidas de los sesgos en la estimación de θ , α_i y β_i , así como la medida del sesgo en la estimación de su propio error por el experto, γ_i , más como valores en torno a un determinado valor que como valores exactos como los utilizados en el análisis anterior. En este caso N podría asignar funciones de distribución a los sesgos y las medidas de dispersión, lo cual es totalmente lícito desde un punto de vista bayesiano; sería un ejemplo de un modelo jerárquico donde se supone que los datos siguen distribu-

ciones dependientes de ciertos parámetros, y estos a su vez siguen cierta ley. Sin embargo, no es recomendable tomar esta senda, ya que, en muchas ocasiones, incluso en el caso gaussiano, se hará demasiado complejo el problema.

Una aplicación de este modelo a predicciones climáticas en el entorno del almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad de Yucca Mountain lo proporcionan Bolado y colaboradores ^[3]. Aplicaciones de una extensión de este modelo a distribuciones logarítmico normales son proporcionadas por Chhibber y colaboradores ^[4] y por Ibáñez y Bolado ^[5].

Caso de un experto y una distribución cualquiera

El caso general del juicio de expertos para un parámetro sobre el que existe incertidumbre y que puede tomar valores en un continuo se da cuando los expertos producen distribuciones completas, no restringiéndose a medidas de centralización y dispersión. En este caso cabrían dos aproximaciones generales: o bien discretizar esas distribuciones obtenidas y aplicar lo que se vió para el caso de varios expertos y varios sucesos, o bien hacer que N genere una verosimilitud para la distribución que cada experto podría dar, es decir N tendría que generar su distribución sobre las distribuciones que cada S_i podría generar. Este es el caso general, cuyo tratamiento se puede volver extremadamente complicado y que sólo se tratará para el caso de un único experto. A continuación se describe un modo posible de tratar este problema debido a West ^[1].

El problema que West propone es similar al caso discreto con un paso al límite. Supóngase que un experto, S , da una distribución $f(\theta)$ para el parámetro θ . N tendrá que producir la verosimilitud para esa distribución, $P(f(\theta)/\theta)$. La distribución dada por S puede discretizarse para una partición de los posibles valores de θ , de modo que, si la partición se constituye con k subconjuntos $\{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ se tendrá que, implícitamente, S habrá subministrado un conjunto de probabilidades $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k\}$ que cumplen:

$$\pi_i = \int_{A_i} f(\theta) d\theta , \tag{A.33}$$

por lo que, habiendo especificado N la verosimilitud $P(f(\theta)/\theta)$, ha especificado implícitamente la verosimilitud de la distribución discretizada equivalente a $f(\theta)$, $P\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k/\theta\}$ para la cual West postula una forma:

$$P\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k/\theta\} \propto \prod_{i=1}^k \pi_i^{\delta \alpha_i(\theta)-1} , \tag{A.34}$$

que es una distribución de Dirichlet, donde δ es un valor positivo que sirve para que N modele la incertidumbre de S sobre θ . En estas condiciones, se considera la densidad $\phi(u/\theta)$ que N atribuye

a la opinión de S cuando el parámetro toma el valor θ , o lo que es lo mismo, dónde cree más verosímil N que S indique que el parámetro estudiado pueda tomar valores cuando de hecho su valor sea θ . En la anterior expresión $\alpha_i(\theta)$ se define del siguiente modo:

$$\alpha_i(\theta) = \int_{A_i} \phi(u/\theta) du, \quad (\text{A.35})$$

y se puede demostrar que:

$$E(\pi_i(\theta)) = \alpha_i(\theta). \quad (\text{A.36})$$

Pasando al límite, haciendo tender k a ∞ y el tamaño de cada A_i a 0 se llega a una expresión del tipo:

$$P(f(\theta)/\theta) \propto e^{-\delta D(\theta)}, \quad (\text{A.37})$$

para la verosimilitud (A.34), donde:

$$D(\theta) = \int \text{Ln} \left(\frac{\phi(u/\theta)}{f(u)} \right) \phi(u/\theta) du, \quad (\text{A.38})$$

es la divergencia de Kullback-Leibler entre las densidades ϕ y f . Esta divergencia se ve claramente que es nula cuando ϕ y f coinciden, siendo positiva y tanto mayor cuanto mayor es la divergencia entre ambas. La fórmula (A.37) indica que el logaritmo de la verosimilitud es menos δ veces la divergencia entre lo que S opina y lo que N cree que S opina, de modo que, para un θ dado, tanto menor será la verosimilitud para ese θ cuanto mayor sea la divergencia entre lo que S cree y lo que N cree que S cree.

A.3 La correlación entre expertos

En los apartados previos se ha hecho referencia en muchos casos a la correlación entre expertos, de lo cual puede deducirse que ésta tiene gran importancia, y de hecho es así. En concreto, en las líneas siguientes se verán los dos efectos genéricos que la correlación induce en las estimaciones apoyadas en el juicio de expertos. El primero de los efectos, netamente bayesiano, se produce cuando se están asignando probabilidades a un conjunto finito de sucesos exhaustivos y mutuamente excluyentes; el segundo efecto se produce cuando se están dando estimaciones puntuales de parámetros de interés.

Considérese el caso de dos únicos sucesos y un conjunto de m expertos y la aproximación normal multivariante para la verosimilitud de los log-odds de los expertos. En estas condiciones N modifica su opinión sobre A de acuerdo con la expresión (A.15). Con el fin de simplificar los cálculos se supondrá que el decisor considera que todos los expertos se comportan del mismo modo y

de forma simétrica (es decir, son tan buenos prediciendo A cuando se da A como prediciendo \bar{A} cuando se da \bar{A}). Esto significa que $\mu_1 = -\mu_0 = \mu = (\mu, \mu, \dots, \mu)$ y que asigna la misma varianza σ^2 a todos los expertos. Supóngase también que todos ellos concuerdan en la opinión dada de forma espontánea ($\bar{q} \equiv (q_1, q_2, \dots, q_m) = (q, q, \dots, q)$), sin recurrir a ninguna interacción de grupo, y que, además, N no tiene una idea propia definida acerca de la probabilidad del suceso, $lo(A/H) = 0$. Con todas estas simplificaciones la expresión (A.15) se transforma en:

$$lo(A/H, \bar{q}) = 2 \cdot \bar{q}^T \cdot \Sigma^{-1} \mu = 2 \cdot q \cdot \mu \cdot \bar{e}^T \cdot \Sigma^{-1} \bar{e}, \tag{A.39}$$

donde $\bar{e} = (1, 1, \dots, 1)$. Esta expresión, para un número de expertos m y suponiendo que todos ellos están igualmente correlacionados dos a dos (coeficiente de correlación ρ), queda reducida, después de unos cálculos, a la expresión:

$$lo(A/H, \bar{q}) = 2 \cdot \frac{m\mu q}{\sigma^2(1+(m-1)\rho)}. \tag{A.40}$$

Esta expresión proporciona la variación en la opinión de N sobre A al recibir el consejo de los m expertos. Primeramente se observa que tanto mayor será la variación de la opinión de N sobre A cuanto mayor sea μ y menor sea σ^2 , es decir, cuanto mejores sean los expertos. Supóngase que $\sigma^2 = 1$, $\mu = 0,5$, $m = 3$ y que estos tres expertos asignan probabilidad $0,7$ al suceso A . Si los expertos son independientes, $\rho = 0$, N atribuirá al suceso A probabilidad $0,93$. Este resultado parece, en principio, sorprendente por su alto valor, mayor que la probabilidad que asignan los expertos independientemente, pero cuando se analiza deja de resultar tan sorprendente y se comprende que es inherente a la aproximación bayesiana. La interpretación del mismo la proporciona Lindley ⁽¹⁾ y fue previamente dada por Savage: si tres expertos coinciden al afirmar que un suceso es más de dos veces más verosímil que su complementario, y los tres expertos son independientes, y aquí radica la razón del aparentemente sorprendente resultado, esto, a los ojos de N es más razonable que se produzca cuando se da A que cuando se da su complementario. Esto lleva al decisor a asignar al suceso en cuestión una probabilidad aún mayor que la proporcionada por los tres expertos. Lo importante en esta interpretación son los modos en que los expertos han llegado al resultado proporcionado: han sido independientes, sin redundancias ni conocimientos importantes comunes. En esencia se está manifestando el hecho de que N asigna alta verosimilitud a la situación en que tres expertos independientes asignen probabilidades mucho mayores a A que a \bar{A} cuando se da A . El problema para poder llegar a un resultado de este tipo es encontrar tres expertos realmente independientes. Si los expertos son totalmente dependientes, $\rho = 1$, la expresión (A.40) queda reducida a:

$$lo(A/H, \bar{q}) = \frac{2 \cdot \mu \cdot q}{\sigma^2}, \tag{A.41}$$

que es la misma expresión que se obtiene, bajo las hipótesis consideradas, cuando se dispone de un único experto. Con los mismos valores que antes ($\mu = 0,5$, $\sigma^2 = 1$, $m = 3$, $q = Ln(0,7/0,3)$) atribuiría probabilidad 0,7 al suceso A . Esto es esperable, ya que si los m expertos son totalmente dependientes (redundancia absoluta en los conocimientos), la información básica que aporta cada uno de ellos es la misma, por lo que la situación es similar a aquella en que se tiene un único experto que aporta la misma información que los m . En resumen, el efecto de la independencia entre expertos es afianzar la opinión de N en la dirección mostrada por los expertos. Cuanto mayor sea la correlación entre los expertos, menor será dicho afianzamiento, llegando al límite de que la opinión de todos los expertos es equivalente a la de uno sólo. El análisis hecho es robusto frente a variaciones en las hipótesis, habiéndose hecho como se ha hecho por simplicidad de cálculo.

Para ver un segundo efecto de la correlación se considerará el caso en que m expertos aportan medidas de centralización y de dispersión para una magnitud de interés. Aceptando las hipótesis del apartado A.2 para el caso recién mencionado, se llega a la distribución *a posteriori* dada en la expresión (A.31), cuya media y varianza vienen dadas por la expresión (A.32). Si además se hace la simplificación adicional de considerar que N no atribuye sesgo alguno a ninguno de los expertos, $\alpha = \bar{0}$ y $\beta = \bar{e} = \gamma$, la expresión (A.32) se transforma en:

$$m' = (\bar{e}^T \Sigma^{-1} \bar{m}) (\sigma')^2 \quad (\text{A.42})$$

$$(\sigma')^2 = (\bar{e}^T \Sigma^{-1} \bar{e})^{-1}.$$

Obsérvese que $(\sigma')^{-2}$ es la precisión de la distribución *a posteriori* que obtiene N para la magnitud de interés. Si se hacen las simplificaciones de suponer que N considera a todos los expertos igualmente precisos, σ^2 común a todos ellos, e igualmente correlacionados cualesquiera dos de ellos, es decir, Σ simétrica con valores σ^2 en la diagonal y $\rho\sigma^2$ fuera de ella, la precisión tomará la forma:

$$(\sigma')^{-2} = \frac{m}{\sigma^2(1 + (m-1)\rho)}. \quad (\text{A.43})$$

Comparando esta expresión con la expresión (23) que aparece en el apartado II.4.2 del documento matriz, y teniendo en cuenta que en este caso se está considerando que N posee una distribución *a priori* no informativa, se ve como esta precisión, para todo valor de m , es monótona decreciente con ρ y está acotada superiormente por m/σ^2 e inferiormente por $1/\sigma^2$. Esto indica que cuanto menor sea la correlación entre los expertos mayor será la disminución de la incertidumbre sobre la magnitud de interés. Los casos límite se dan cuando los expertos son totalmente independientes, $\rho = 0$, de modo que la disminución de incertidumbre es idéntica a la proporcionada por una muestra aleatoria simple, cuya precisión es m/σ^2 , y cuando los expertos están totalmente correlacionados, $\rho = 1$, la disminución de incertidumbre es mínima, siendo en este caso la precisión igual a la

de un único experto ($1/\sigma^2$). Obsérvese que para este análisis se ha dado igual significado a los conceptos de disminución de varianza en la estimación, aumento de precisión, y disminución de la incertidumbre sobre la magnitud de interés.

Al hilo de lo anterior, y de modo natural, surge el concepto de *número equivalente de expertos independientes* introducido por Clemen y Winkler [2]. Este valor, $n(\sigma^2, \Sigma)$, es el número de expertos totalmente independientes con varianza común σ^2 que produce una distribución *a posteriori* con varianza igual a la de m expertos considerados con matriz de varianzas y covarianzas Σ . En el caso que nos ocupa, expertos igualmente precisos e igualmente correlacionados dos a dos, el número equivalente de expertos se obtiene al igualar la expresión (A.43) con esa misma ecuación pero con $\rho = 0$, en cuyo caso ha de sustituirse m por $n(\sigma^2, \Sigma)$ con lo que, despejando $n(\sigma^2, \Sigma)$, se llega al resultado:

$$n(\sigma^2, \Sigma) = \frac{m}{1 + (m-1)\rho} \quad (\text{A.44})$$

Esta igualdad se representa en la figura A.1 para diversos valores de ρ , apreciándose como para cada uno de esos valores de ρ el número equivalente de expertos independientes converge asintóticamente al valor $1/\rho$. Este es un resultado muy interesante en el que se basa la afirmación de Bonano y colaboradores [7] acerca de que entre tres y cinco expertos es una cantidad suficiente para realizar una evaluación. Se puede comprobar que para un coeficiente de correlación extremadamente bajo, como 0.2, no se puede pasar de un número de cinco expertos independientes equivalentes.

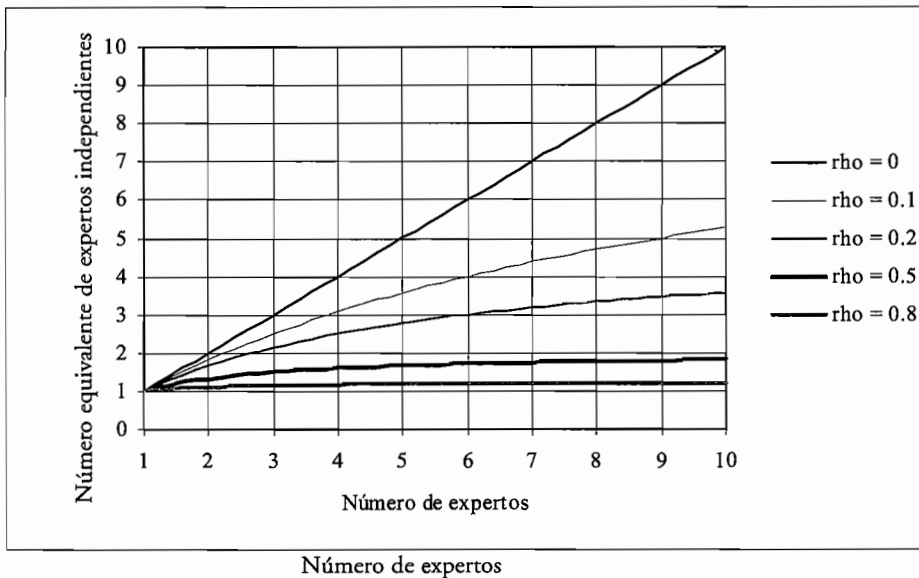


Figura A. 1. Número equivalente de expertos independientes para un conjunto de expertos de igual precisión en función del coeficiente de correlación común de los expertos.

La aparición de los términos de correlación entre los expertos al dar sus opiniones es un problema serio, ya que, en general, es bastante difícil para N establecer su magnitud. Lindley ^[1] propone, como mejor modo de generar los coeficientes de correlación o covarianzas, modelar las relaciones entre los conocimientos de los expertos en cuestión. Por otra parte, Gokhale y Press ^[6] han desarrollado dos procedimientos para la evaluación del coeficiente de correlación de una población normal bivalente, basados en las probabilidades de “concordancia” y “superación”. Los propios autores recomiendan el primer procedimiento, el de la probabilidad de concordancia, por ser más sencillo de utilizar.

La idea fundamental del procedimiento de Gokhale y Press es que a los individuos les puede resultar más sencillo evaluar una función de ρ en lugar del propio parámetro directamente. Por lo tanto se trata de definir alguna función apropiada para esta tarea. Para dos observaciones independientes (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) de una distribución normal bivalente se define la probabilidad de concordancia como:

$$\tau(\rho) \equiv P\{(X_1 < X_2, Y_1 < Y_2) \cup (X_2 < X_1, Y_2 < Y_1)\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsen(\rho). \quad (\text{A.45})$$

Es fácil demostrar que $\tau(\rho)$ también es igual a la probabilidad de que $Y_2 > Y_1$ condicionada por $X_2 > X_1$, es decir, $\tau(\rho) = P(Y_2 > Y_1 | X_2 > X_1)$. Por lo tanto se puede evaluar ρ indirectamente a través de $P(Y_2 > Y_1 | X_2 > X_1)$. Para ello el decisor N intenta imaginar los valores X_1 e Y_1 que darían los expertos X e Y para la variable de interés, con lo que se forma el par (X_1, Y_1) . En un segundo momento el decisor postula la situación en que el experto X revisa su opinión al alza, $X_2 > X_1$, y se da al experto Y la oportunidad de emitir un nuevo juicio Y_2 . Puede ocurrir que $Y_2 > Y_1$ o que $Y_2 < Y_1$ dependiendo del tipo de correlación existente entre los expertos. El decisor debe estimar el comportamiento concordante o discordante de los expertos dando un valor a $P(Y_2 > Y_1 | X_2 > X_1)$. Este método se puede aplicar a varios expertos considerándolos de dos en dos.

Referencias bibliográficas

- [1] D.V. Lindley, Introduction. *Accelerated Life Testing and Experts Opinion in Reliability*, Proceedings of the CII Course of the International School of Physics “Enrico Fermi” on Accelerated Life Testing and Expert Opinions on Reliability, North Holland, 1988.
- [2] R.T. Clemen, R.L. Winkler, Limits for the Precision and Value of Information from Dependent Sources, *Operations Research*, 33, 1985: 427-442.
- [3] R. Bolado, A. Lantarón and J.A. Moya, *An Exercise on Bayesian Combination of Expert Judgement for Climatic Predictions at the Yucca Mountain Site*, Proceedings of the ESREL'96/PSAM-III Conferences, Vol 1, pages 505-510, Springer (1996).

- [4] S. Chhibber, G.E. Apostolakis and D. Okrent, On the Use of Expert Judgments to Estimate the Pressure Increment in the Sequoyah Containment at Vessel Breach, *Nuclear Technology*, Vol 105, 1994. Pages: 87-103.

- [5] J. Ibáñez y R. Bolado, Evaluación de la combustión del hidrógeno en un reactor PWR evolutivo genérico mediante juicio de expertos. Informe técnico de la Cátedra de Tecnología Nuclear CTN-19/98. Madrid, Julio 1998.

- [6] D.V. Gokhale, S.J. Press, "Assessment of a Prior Distribution for the Correlation Coefficient in a Bivariate Normal Distribution", *J.R. Statist. Soc. A*, 145, Part 2, 1982: 237-249.

- [7] E. J. Bonano S.C. Hora, R.L. Keeney and D. von Winterfeldt, *Elicitation and Use of Expert Judgment in Performance Assessment for High-Level Radioactive Waste Repositories*, Sandia National Laboratories, SAND89-1821 (NUREG/CR-5411), May 1990.

B. El protocolo CTN de Juicio de Expertos

Introducción

En este apéndice se describe un protocolo elaborado por la Cátedra de Tecnología Nuclear (CTN) de la Universidad Politécnica de Madrid para *caracterizar las incertidumbres asociadas a parámetros numéricos y a sucesos de interés*, cuyo diseño y desarrollo se ha enmarcado en un convenio de colaboración suscrito por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la CTN. Este protocolo ha sido aplicado ya en una ocasión con éxito en el seno de una Acción Concertada con la Unión Europea (UE) para la comparación de diferentes metodologías de juicio de expertos en la que ha participado CTN-UPM en colaboración con CSN ^[1].

B.1. El protocolo CTN

Para la definición del *protocolo CTN* se ha recurrido a la experiencia acumulada hasta el momento en el ámbito nuclear sobre la objetivación del juicio de expertos ^[2,3,4,6]. Esta experiencia está considerada a grandes rasgos en un documento de la NRC de los Estados Unidos relativo al uso del juicio de expertos en las evaluaciones de seguridad de los almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad ^[5]. En este documento la NRC define las actividades básicas que debe considerar todo protocolo a fin de garantizar unas opiniones de calidad. Existe además un protocolo de juicio de expertos, el utilizado de modo extensivo en la realización del informe NUREG-1150, ampliamente utilizado en la última década y que puede ser considerado un protocolo de referencia.

Teniendo en cuenta esencialmente todo lo mencionado en el párrafo anterior, el protocolo CTN se ha diseñado y desarrollado en las siguientes nueve fases que se suceden secuencialmente en el tiempo:

1. Selección del equipo de proyecto.
2. Definición y estudio de la cuestión a evaluar.
3. Selección de los expertos.
4. Entrenamiento.
5. Definición de la tarea.
6. Trabajo individual de los expertos.
7. Obtención de la opinión de los expertos.
8. Análisis y agregación de los resultados.
9. Documentación.

Frente a otros protocolos con procedimientos normalizados nuestra aproximación presenta la ventaja de flexibilizar la fase de agregación de opiniones, lo que permite adaptarse a las necesidades de cada caso particular. Junto a estas ventajas se tiene que citar el inconveniente que supone tener que conocer y saber aplicar un amplio espectro de técnicas de análisis y agregación de opiniones, es decir, es necesario disponer de analistas con amplios conocimientos en los aspectos normativos de los procesos de objetivación del juicio de expertos.

B.2. Descripción del protocolo

El protocolo que se va a comentar está destinado a caracterizar la incertidumbre asociada a parámetros sobre los cuales se tiene un conocimiento incompleto. En general la necesidad de recurrir a la opinión de los expertos para tal fin se presenta cuando dichas incertidumbres no se pueden resolver por los procedimientos clásicos de la ciencia (construcción de modelos, cálculos teóricos, mediciones, observaciones, simulación, etc.) por motivos de diversa índole (tiempo, coste, complejidad, etc.). A su vez, los procesos de objetivación del juicio de expertos suponen un coste en tiempo y dinero, por lo que no siempre está justificada su utilización.

En general, los procesos de objetivación del juicio de expertos se deben utilizar cuando se está en presencia de parámetros muy importantes para el estudio o proyecto que se esté realizando y que están afectados de incertidumbres no resolubles. No obstante, los criterios particulares para determinar qué cuestiones se deben someter a la opinión de los expertos los debe establecer la institución interesada en el tema en el marco del proyecto que se esté ejecutando. En cualquier caso, la situación de la que se parte es la de una institución que ya ha determinado la necesidad de obtener formalmente la opinión de los expertos sobre un determinado tema que desea estudiar.

La explicación de los términos y técnicas concretas que se mencionan a continuación se pueden encontrar en los diferentes capítulos del documento matriz.

B.2.1. Selección del equipo de proyecto

Para realizar el ejercicio de juicio de expertos se establece en primer lugar un equipo de *proyecto* compuesto por *analistas y generalistas*. Los analistas son los encargados de ejecutar las distintas fases del proceso de objetivación del juicio de expertos, por lo que deben poseer buenos conocimientos y experiencia en el tema. Las áreas particulares de conocimiento requeridas son la estadística y teoría de probabilidades, la psicología del conocimiento y las técnicas de objetivación. Además, deben poseer habilidad para el trato con las personas, puesto que serán los analistas quienes tengan que obtener la opinión de los expertos a través de una interacción directa con

ellos. En cuanto a su número, dependerá de las necesidades particulares de cada caso, aunque normalmente dos será suficiente.

La función de los generalistas es auxiliar a los analistas en los aspectos del proceso de objetivación del juicio de expertos que tienen que ver con el tema que se evalúa, por ejemplo la descomposición de las cuestiones o la identificación y suministro de fuentes de información. Por tanto, deben conocer de un modo general el tema que se quiere evaluar, aunque no es necesario que sean investigadores punteros en el mismo. Para la selección de los generalistas se tendrá en cuenta, además de sus conocimientos técnicos, su capacidad de organización y de trato con las personas, puesto que tratarán con los expertos en diversas fases del proceso. El número de generalistas dependerá nuevamente de las necesidades de cada caso particular, y en cuanto a su procedencia, en general los aportará la institución interesada en el tema, aunque también cabe la posibilidad de que se tenga que recurrir a personas de otras instituciones o empresas que acepten participar.

B.2.2. Definición y estudio de la cuestión a evaluar

Una vez que se ha establecido el equipo de proyecto se puede pasar a definir y estudiar la cuestión específica que se someterá a la opinión de los expertos, tarea que deben realizar conjuntamente los analistas y generalistas.

En general el tema propuesto inicialmente estará definido de forma vaga e imprecisa y será necesario llegar a una *definición completa* del parámetro cuya incertidumbre se quiere evaluar. El concepto de definición completa incluye, además de la propia definición del parámetro, las *condiciones iniciales* bajo las cuales se hará la evaluación de dicho parámetro y la identificación explícita de cualquier *hipótesis* implícita que pueda estar subyacente en dichas condiciones iniciales. La definición adoptada se debe redactar como una *cuestión* clara y precisa, sin ambigüedades, que pueda pasar el *test del clarividente*.

La definición completa de la cuestión incluye la *forma* en que se pedirá la opinión de los expertos. En este protocolo se adopta la teoría de probabilidades como medio de representar la incertidumbre, y en concreto su interpretación bayesiana, en la que tienen cabida las opiniones subjetivas de los expertos. Por lo tanto las opiniones de los expertos se emitirán en forma de distribuciones de probabilidad, ya sean discretas, ya sean continuas, para el valor del parámetro cuya incertidumbre se evalúa. Para el caso de distribuciones discretas habrá que determinar los valores específicos a considerar, mientras que para las distribuciones continuas se puede optar por obtener toda la distribución o sólo sus percentiles más significativos.

Cuando se ha definido completamente la cuestión se pasa a la etapa de estudio, que consiste en elaborar una lista de las fuentes de información *relevantes* (datos, modelos, análisis, códigos,

etc.) que deben considerar los expertos para elaborar sus juicios y en analizar eventuales *descomposiciones* del parámetro de interés en parámetros de menor nivel que sean más fáciles de evaluar. Respecto a la selección de las fuentes de información hay que tener en cuenta que debe reflejar de forma completa el estado de conocimiento sobre el parámetro en cuestión pero vigilando al mismo tiempo su *independencia y fiabilidad*.

Las posibles descomposiciones vendrán determinadas por la cantidad y tipo de fuentes de información identificadas, es decir, por el nivel de detalle de la información disponible. Para cada posible descomposición se deben definir completamente los *parámetros de menor nivel* y la dependencia funcional del parámetro de interés con respecto a ellos.

Otra tarea de la etapa de estudio consiste en investigar la eventual utilización por parte de los expertos de *análisis de incertidumbre* para tratar algunos aspectos de la evaluación. Esta situación se da típicamente cuando se pueden utilizar códigos de cálculo para estimar los valores de magnitudes que son importantes en la evaluación del parámetro de interés. La identificación de estas técnicas (*muestreo, superficies de respuesta, etc.*) se hace con el fin de incluirlas como temas a tratar en la quinta etapa del protocolo (definición de la tarea).

B.2.3. Selección de los expertos

El objetivo de esta fase es seleccionar los expertos mejor cualificados para realizar el ejercicio de juicio de expertos. Son *expertos cualificados* todos aquellos que:

- Poseen los conocimientos y experiencia necesaria para hacer las evaluaciones.
- Están dispuestos a participar.
- No presentan *sesgos motivacionales* importantes.

En general la procedencia de estos expertos cualificados puede ser cualquiera (organismos públicos, centros de investigación, universidad, ingenierías, etc.).

El proceso de selección de los expertos cualificados comienza por la elaboración de una *lista de expertos* mediante sugerencias de los generalistas, la revisión de la bibliografía técnica relevante o una eventual petición pública de propuestas de candidatos (dentro de lo que cabe la posibilidad de que algunas personas se propongan a sí mismas). Para determinar la cualificación de estos candidatos se debe concertar una entrevista con cada uno de ellos en la que participan un analista y un generalista. La entrevista constará de tres fases en las que se determinará sucesivamente la disposición del experto a participar, sus conocimientos y experiencia en el tema y la importancia de sus eventuales *sesgos motivacionales*.

La primera fase comienza con una charla en la que se tratan las siguientes cuestiones:

- La descripción global del ejercicio de juicio de expertos.
- Cómo y porqué se ha elegido al experto.
- La descripción detallada de la tarea que deberá realizar, incluyendo el tiempo que requerirá.

Posteriormente se pregunta al experto sobre su disposición a participar con carácter voluntario, y en caso contrario se podrán tratar las posibles cuantías de dinero por las cuales accedería a participar.

La segunda fase de la entrevista consiste en repasar conjuntamente con el experto su *curriculum vitae*, que deberá contemplar su formación académica e historia profesional y contendrá además una lista completa de sus publicaciones y trabajos en el ámbito que interesa. Un aspecto importante a identificar es el nivel de reconocimiento que tiene cada experto en la comunidad profesional relacionada con el tema.

Finalmente en la tercera fase se tratan los temas de la confidencialidad de las opiniones y los posibles sesgos motivacionales. En cuanto a lo primero, se le debe explicar al experto que lo óptimo es que se comprometa con sus opiniones a fin de dar mayor credibilidad al ejercicio de juicio de expertos. En caso de que el experto alegue razones en contra deberá decidir entonces qué tipo de trato prefiere entre los siguientes:

- Poner los nombres de los expertos y su procedencia sin identificar las opiniones individuales.
- Poner sólo la procedencia de los expertos sin identificar las opiniones individuales.
- El total anonimato.

Para determinar los eventuales sesgos motivacionales del experto se debe indagar sus posibles afiliaciones, actuales o pasadas, a empresas o instituciones que sean o puedan ser parte interesada en el problema que se trata. En caso de que se detecten indicios de sesgos se intentará evaluar su importancia de cara a diseñar posibles soluciones en fases posteriores del proceso si el experto es finalmente seleccionado.

Una vez finalizadas las entrevistas con los candidatos se tendrá una lista definitiva de expertos cualificados, que estará compuesta por los expertos que han accedido a participar (voluntariamente o no), poseen los conocimientos y experiencia necesarios y no presentan sesgos motivacionales muy importantes. Entre ellos hay que seleccionar a aquellos que finalmente participarán en el ejercicio de juicio de expertos, para lo cual habrá que ponderar los méritos anteriores con otros dos criterios de carácter general: limitar el número de expertos, cuyo número óptimo está entre tres y cinco

según indican las investigaciones teóricas relativas a la *correlación entre expertos* (véase último apartado del apéndice A de este mismo documento), e incluir el mayor número posible de puntos de vista e intereses con el fin de asegurar el equilibrio en la caracterización de la incertidumbre.

Aunque la situación genérica que se contempla en este protocolo es la de expertos individuales, cabe sin embargo la posibilidad de formar varios grupos de expertos para que cada uno de ellos evalúe la cuestión de interés. Esto ocurrirá típicamente cuando tales cuestiones sean complejas, de modo que requieran distintos ámbitos de conocimiento para su evaluación, y también cuando se hayan identificado muchos expertos cualificados para un determinado tema y se desee tenerlos en cuenta a todos. En tales casos la formación de grupos se hará bajo los mismos criterios ya mencionados.

B.2.4. Entrenamiento

La fase de entrenamiento tiene por finalidad dar a conocer a los expertos los aspectos normativos de los procesos de objetivación del juicio de expertos. En concreto, los objetivos básicos son:

- Motivar a los expertos para que hagan sus evaluaciones con rigor.
- Enseñarles los conceptos básicos de la teoría de probabilidades.
- Proporcionarles práctica en la evaluación de probabilidades subjetivas.
- Enseñarles los temas básicos acerca de los *sesgos del conocimiento*.

Esta fase de entrenamiento la llevan a cabo los analistas del equipo de proyecto mediante una reunión interactiva con todos los expertos que normalmente durará medio día.

Durante la fase de motivación se debe explicar a los expertos cuatro cuestiones específicas con el fin de resaltar la importancia que tiene la tarea que van a realizar. En primer lugar se hará una descripción genérica del proyecto o estudio en el cual se enmarca el ejercicio de juicio de expertos y se mostrará claramente la parte de dicho proyecto o estudio en que son útiles sus opiniones. En segundo lugar, se explicará porqué es necesario acudir a la opinión de los expertos, es decir, se entrará a tratar el tema de las *incertidumbres del conocimiento* y se ilustrará con el caso específico que ellos deben evaluar. La tercera cuestión a comentar, relacionada con la anterior, es la naturaleza de la tarea que deben realizar: se hará énfasis en que el objetivo del ejercicio de juicio de expertos es caracterizar la incertidumbre sobre un determinado parámetro, no predecir su valor. Por último, se hará ver a los expertos que sus opiniones no deben considerarse como un sustituto de la investigación científica, sino como un medio para conocer el estado de conocimiento sobre una determinada cuestión.

La charla anterior se puede utilizar también para contrarrestar posibles sesgos motivacionales detectados durante la fase de selección. Para ello se intentará cambiar la estructura de incentivos que perciben los expertos apelando a su altruismo para ayudar a tratar una cuestión importante para la ciencia o haciéndoles ver la oportunidad que tienen de experimentar con procesos nuevos y diferentes.

Una vez finalizada la fase anterior se pasa a explicar la forma que deben adoptar las opiniones de los expertos (distribuciones de probabilidad) y se justifica por tanto la necesidad de darles unos conocimientos básicos acerca de la teoría de probabilidades. El contenido de la charla tratará los capítulos imprescindibles de dicha teoría y en concreto, dada su importancia, se hablará del concepto de probabilidad y su interpretación bayesiana, que es la que se adopta como marco teórico del juicio de expertos.

El siguiente paso, la enseñanza en la evaluación de probabilidades subjetivas, requiere tratar tres aspectos concretos: la definición precisa de las cuestiones a evaluar, la descomposición como medio de simplificar la tarea y la valoración de las evidencias para estimar las probabilidades. Al hablar de la definición de las cuestiones se hará hincapié en la necesidad de hacer explícitas todas las suposiciones implícitas y se comentarán ejemplos de cuestiones bien y mal definidas. Lo mismo ocurre para el caso de la descomposición, en donde se comentarán casos sencillos para introducir las técnicas de los *diagramas de influencia* y los *árboles de sucesos*. En cuanto a la valoración de las evidencias se deberán explicar los conceptos de *independencia* y *fiabilidad* de las fuentes de información de nuevo con ejemplos ilustrativos. Una vez explicado todo lo anterior se pueden plantear a los expertos casos sencillos para que se familiaricen con la evaluación de probabilidades subjetivas.

La parte final de la reunión se dedicará a exponer los sesgos del conocimiento más importantes que pueden llevar a evaluaciones erróneas: *representatividad, disponibilidad y anclaje y ajuste*. Se deberá alertar a los expertos sobre la facilidad con que se pueden presentar estos sesgos y para el caso particular del anclaje y ajuste, que lleva a la *sobreconfianza*, se pueden plantear *ejercicios de calibrado*.

B.2.5. Definición de la tarea

Esta fase, al igual que la anterior, se desarrolla mediante en una reunión interactiva entre los expertos y el equipo de proyecto. Su finalidad es explicar a los expertos de forma detallada la cuestión que deben evaluar y establecer la forma de trabajo que adoptará cada uno de ellos. Esta fase se sirve del trabajo realizado previamente por el equipo de proyecto durante la segunda etapa del protocolo.

La sesión comienza con una presentación por parte de un generalista de la cuestión a evaluar, incluyendo las fuentes de información que el equipo de proyecto identificó como relevantes. Tras esta presentación los expertos deberán opinar sobre la definición de la cuestión y la necesidad de considerar otros datos, modelos, cálculos, etc. diferentes a los propuestos. El resultado de esta dis-

cusión será un eventual refinamiento de la definición completa del parámetro a evaluar y una mejor comprensión de las fuentes de información necesarias para poder evaluar apropiadamente el tema. Un objetivo muy importante es que se llegue a *definiciones comunes* para todos.

Un segundo paso en esta fase consiste en estudiar las posibles formas de descomponer la cuestión con el fin de que cada experto adopte eventualmente la que crea más adecuada. De nuevo el equipo de proyecto propondrá inicialmente una descomposición que se someterá a discusión, de la cual saldrán formas alternativas de desagregación. El principio a seguir en este punto es que cada experto puede adoptar la descomposición que crea más conveniente de acuerdo con sus conocimientos sobre el tema. En el caso usual de que se decida descomponer la cuestión, los expertos solamente deberán evaluar las variables de menor nivel, mientras que la agregación de las mismas la realizarán los analistas del equipo de proyecto. En el caso de que alguno de los expertos presente sesgos motivacionales se deberá hacer especial énfasis en la descomposición, puesto que es el mejor modo de cambiar la estructura de intereses que perciben los expertos.

Un aspecto importante que se debe tratar durante la discusión de la descomposición es la posible utilización de análisis de incertidumbres y sensibilidad para sacar conclusiones acerca de los valores de las variables de menor nivel o de otras relacionadas con ellas. En el caso de que los expertos consideren importante el tema se podrá entrar en una explicación detallada de dichos procedimientos y su conexión con el problema de interés.

En el caso de que se utilicen grupos de expertos en lugar de expertos individuales esta fase servirá para establecer la tarea particular que realizará cada experto dentro de un grupo, es decir, las variables desagregadas que evaluará cada uno de ellos.

B.2.6. Trabajo individual de los expertos

En esta etapa, como su propio nombre indica, los expertos realizan los análisis y estudios necesarios para evaluar la incertidumbre que se les pide, y ello de acuerdo con la descomposición o plan de trabajo que hubieran definido en la etapa anterior. Cada experto elaborará un documento en el que se explicarán las suposiciones realizadas en su estudio, el procedimiento seguido en el mismo y las conclusiones alcanzadas, y si así lo desean, también una estimación de las incertidumbres que se quieren evaluar. El tiempo necesario para la elaboración de los análisis dependerá de cada caso particular y se habrá establecido en la fase anterior.

Durante este período de trabajo individual los expertos pueden reclamar la ayuda de los miembros del equipo de proyecto para aclararles las posibles dudas que les surjan, ya sean referentes a la propia cuestión a evaluar o a los métodos matemáticos que pueden utilizar.

Esta etapa culmina en una reunión del equipo de proyecto con los expertos, en la que cada uno de éstos presenta el trabajo realizado y las razones que justifican las conclusiones alcanzadas. Esta reunión sirve para la puesta en común de los diversos razonamientos seguidos para evaluar la cuestión y como foro de discusión de los mismos, con el fin último de permitir a los expertos modificar sus propios trabajos si así lo creen oportuno.

B.2.7. Obtención de la opinión de los expertos

En esta fase los expertos evaluarán formalmente la incertidumbre sobre el parámetro en cuestión en una *sesión de objetivación* con el equipo de proyecto.

La sesión de objetivación se realiza individualmente para cada experto y en un entorno aislado sin ruidos ni interrupciones. En particular, puede ser el propio lugar de trabajo del experto si reúne las condiciones mencionadas. Por parte del equipo de proyecto es suficiente con un analista (*entrevistador*), pero a ser posible deberían estar presentes otro analista y un generalista. El entrevistador obtiene, mediante preguntas, la evaluación del experto para cada una de las variables que se hayan acordado en la fase anterior. Además, para cada respuesta el experto debe aportar las razones que a su juicio la justifican. La misión del segundo analista es auditar todo el proceso de modo que no se produzcan irregularidades, y en particular cuidar de que el entrevistador no introduzca sesgos por una aplicación abusiva de las técnicas para aminorar los mismos. Por su parte, el generalista puede aportar su conocimiento sobre el tema que se evalúa para ayudar al entrevistador en la comprobación de los razonamientos del experto.

La sesión de objetivación comienza con un recordatorio del objetivo de la reunión por parte del entrevistador, que seguidamente invita al experto a que proporcione un breve resumen de su aproximación al problema incluyendo la descomposición utilizada. Si esta descomposición coincide con la acordada en la fase anterior el entrevistador pasa a recordar al experto las definiciones adoptadas y pide su confirmación a fin de asegurarse de que ambos están trabajando sobre las mismas variables. En caso de que surjan discrepancias en esta etapa previa se deben resolver antes de continuar, y si las mismas afectan a cuestiones fundamentales lo aconsejable es aplazar la sesión de objetivación para reconsiderar la tarea posteriormente. Una vez hechas estas comprobaciones se pasa a evaluar una a una las variables acordadas mediante el esquema mencionado de pregunta-respuesta con justificación. Además, a intervalos regulares de tiempo se deben hacer controles para comprobar la consistencia entre las distintas respuestas del experto, y en el caso de que éstas se presenten se volverá a hacer toda la evaluación a partir del punto en que aparecieron.

Las técnicas que se pueden utilizar para obtener evaluaciones subjetivas de probabilidad son las estándares descritas por la bibliografía habitual: cuantiles para las distribuciones continuas y esti-

mación de probabilidades (por procedimientos directos o indirectos) para las discretas. En el caso de distribuciones continuas se admiten además otros procedimientos (dibujo de la distribución, estimación de parámetros, etc.) siempre que el experto exprese su deseo de hacerlo así.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la forma de documentar la sesión de objetivación. Se puede recurrir a cualquier procedimiento, ya sea escrito, de audio o de vídeo. En el caso de que la documentación sea mediante notas escritas es aconsejable la participación de dos analistas para agilizar el trabajo, ya que el entrevistador puede anotar las respuestas y el segundo analista las justificaciones del experto.

B.2.8. Análisis y agregación de los resultados

El objetivo de esta fase es analizar las evaluaciones proporcionadas por los expertos para comprobar que no presentan sesgos importantes y que los razonamientos en los que se basan son correctos desde el punto de vista lógico; además, en general será necesaria una estimación global de la incertidumbre del parámetro de interés, para lo cual habrá que agregar las evaluaciones individuales.

El análisis de los resultados comienza por la lectura, por parte de los analistas, de la documentación aportada por los expertos para comprobar que los razonamientos realizados son correctos. Posteriormente se estudian las discrepancias entre las evaluaciones individuales de los distintos expertos para verificar que las mismas se deben a diferentes y legítimas creencias sobre el parámetro cuya incertidumbre se evalúa y nunca a la presencia de sesgos tales como inconsistencias, anclaje y ajuste o disponibilidad. Para detectar indicios de estos sesgos se revisa la documentación de las sesiones de objetivación. Si se detectan aspectos poco claros o deficientemente documentados se contactará con el experto para pedirle las aclaraciones necesarias, y en caso de que se hayan producido errores que afecten a la lógica del razonamiento o bien haya claras evidencias de sesgos importantes será necesario rehacer el proceso desde el punto correspondiente.

Una vez realizado el análisis de los resultados se pasa a la fase de agregación, cuyo contenido depende de la importancia de las diferencias entre las opiniones de los expertos. Esta importancia la determinan conjuntamente los generalistas y los analistas mediante un *análisis de sensibilidad*. Si este análisis indica que el rango de opiniones no afecta significativamente a los resultados que dependen del parámetro que se ha evaluado entonces se pasa directamente a la agregación analítica de las evaluaciones. En caso contrario será necesaria una fase previa de discusión y confirmación de resultados con los expertos.

La discusión y confirmación de resultados se hace mediante una reunión del equipo de proyecto con los expertos (*sesión de reconciliación*). Esta reunión seguirá el formato del *grupo nominal*,

es decir, estará dirigida por un analista para evitar en la medida de lo posible la presencia de *sesgos de grupo*, y su objetivo es determinar mediante la interacción cara a cara de los expertos la incertidumbre real a la que está sometido el parámetro que se evalúa. Si tras la discusión de las distintas posturas se llega a un consenso sobre dicha incertidumbre entonces los expertos deberán evaluar conjuntamente una única distribución de probabilidad, para lo cual se pueden seguir las técnicas comentadas en la fase de obtención de las opiniones individuales. En caso contrario se pedirá a cada experto que reevalúe sus estimaciones iniciales a la luz de la nueva discusión, que serán agregadas posteriormente por procedimientos analíticos. El esquema de la reunión seguirá la siguiente pauta:

- Motivación.
- Identificación de diferencias.
- Discusión de los fundamentos de cada evaluación inicial.
- Discusión de las fuentes de información utilizadas.
- Reelaboración de las evaluaciones individuales o evaluación conjunta.

Para la agregación analítica de las opiniones se puede utilizar tanto la *combinación lineal* como la *combinación bayesiana*. Esta última estará particularmente indicada en aquellos casos en que se desee tener en cuenta la opinión de la institución u organismo interesado en el tema. En cuanto a la combinación lineal, se considerará la asignación de pesos iguales como el esquema a seguir por defecto, a no ser que otras consideraciones justifiquen una asignación diferenciada. En cualquier caso lo importante es que siempre se aporten las razones que justifican la elección realizada.

B.2.9. Documentación

La documentación del ejercicio de juicio de expertos será completa, incluyendo tanto los propios resultados como la descripción detallada de todo el proceso seguido para llegar a ellos. El índice de la documentación seguirá el curso del propio proceso de objetivación del juicio de expertos, y para cada fase habrá que reflejar qué se ha hecho, por qué se ha hecho, cómo se ha hecho y quién lo ha hecho. Para conseguir este objetivo se debe seguir en cada fase un sistema de documentación normalizada en la medida de lo posible. Respecto a los resultados del ejercicio se debe tener especial cuidado en diferenciar claramente cuáles fueron las evaluaciones de los expertos y cuáles las modificaciones a las que se sometieron para hacer la agregación o cualquier tipo de análisis.

Referencias bibliográficas

- [1] G. Cojazzi *et al.*, Benchmark Exercise on Expert Judgment Techniques in PSA Level 2, Paper presented at the FISA'97 meeting on EU research on severe accidents, 17-19 November 1997. EUR Report 18258. Pages 468-480. Luxembourg, 1998.

- [2] J. Ibáñez, R. Bolado, J.A. Moya, El Juicio de Expertos: Fundamentos, Técnicas y Procedimientos, Informe técnico de la Cátedra de Tecnología Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid CTN-04/97 (Borrador), Marzo 1997.
- [3] E.J. Bonano, S.C. Hora, R.L. Keeney, D. von Winterfeldt, Elicitation and Use of Expert Judgment in Performance Assessment for High-Level Radioactive Waste Repositories, NUREG/CR-5411, May 1990.
- [4] S.C. Hora, R.L. Iman, Expert Opinion in Risk Analysis: The NUREG-1150 Methodology, Nuclear Science and Engineering, 102 (1989), págs. 323-331.
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Branch Technical Position on the Use of Expert Elicitation in the High-Level Radioactive Waste Program, NUREG-1563, December 1996.
- [6] M.A. Meyer, J.M. Booker, Eliciting and Analyzing Expert Judgment, NUREG/CR-5424, January 1990.

C. Evaluación de la combustión del hidrógeno en un reactor PWR evolutivo genérico

Introducción

La evaluación de la combustión del hidrógeno en la contención de un reactor PWR evolutivo genérico ha sido una aplicación piloto de juicio de expertos realizada por CTN-UPM y que se llevó a cabo en siete meses, desde junio hasta diciembre de 1997. Las actividades desarrolladas en este ejercicio de juicio de expertos, que se ha realizado siguiendo la metodología expuesta en el apéndice B de este mismo documento, se pueden agrupar en cinco fases: actividades previas al entrenamiento, entrenamiento, periodo de estudio, obtención de las evaluaciones de los expertos y agregación y documentación.

C.1. Actividades previas

Este ejercicio de juicio de expertos se ha realizado en el marco de la fase 2 del proyecto europeo BE-EJTs ^[1] y por lo tanto el tema de la combustión del hidrógeno fue propuesto por la organización de dicho proyecto ^[2]. El reactor en consideración es un PWR evolutivo genérico con una gran contención seca en cuya parte inferior existe una piscina de almacenamiento de agua, denominada IRWST, que proporciona agua para la refrigeración de emergencia y sirve como sumidero de la contención. El sistema de refrigeración del reactor está equipado con un mecanismo de despresurización que descarga en el IRWST a través de cuatro burbujeadores. En el IRWST existen cuatro aberturas que conectan la atmósfera del mismo con los habitáculos inferiores de la contención, en las cuales existen ocho ignitores situados por parejas justo encima de las aberturas. En la zona intermedia de la contención existen doce recombinadores homogéneamente distribuidos, mientras que en el IRWST no existe ningún equipo eléctrico susceptible de producir chispas.

En este escenario se supone una pérdida del suministro eléctrico exterior sin disponibilidad de los generadores diesel de emergencia (*station blackout*). Después de cuatro horas el núcleo comienza a fundirse pero justo en ese momento se recupera el suministro exterior y la vasija comienza a reinundarse. Al mismo tiempo el hidrógeno y vapor previamente generados se descargan en la fase líquida del IRWST a través del sistema de despresurización. La secuencia accidental a estudiar comienza en este momento y su duración es de 1.000 segundos. Los datos proporcionados por la organización fueron los siguientes:

- Las tasas de emisión de vapor e hidrógeno entre $t = 0$ y $t = 1000$ s.
- Las condiciones en el IRWST y los habitáculos inferiores de la contención en $t = 0$ s.

- La cantidad total de gases nobles (Xe y Kr) liberados a la atmósfera de la contención y la cantidad total de I y Cs liberados en el agua del IRWST.
- Datos geométricos aproximados de la contención y más detallados del IRWST, las aberturas y los habitáculos inferiores de la contención.
- Un esquema aproximado de las tuberías y conductos de ventilación localizados encima de las aberturas, en los habitáculos inferiores de la contención.

Se propusieron las siguientes cuestiones para ser evaluadas mediante juicio de expertos:

1. Distribución seguida por la probabilidad de que se produzca al menos una combustión dentro del IRWST entre 0 y 1.000 segundos.
2. Distribución seguida por la probabilidad de que se produzca al menos una combustión dentro del IRWST debido a la propagación de llamas provenientes de los habitáculos inferiores de la contención entre 0 y 1.000 segundos.
3. Distribución seguida por la probabilidad de que se produzca al menos una detonación dentro del IRWST entre 0 y 1.000 segundos.

Para estas cuestiones era suficiente con proporcionar los percentiles 5%, 50% y 95%, aunque si era posible también se podía generar una distribución de probabilidad completa.

Los autores del presente apéndice, Ricardo Bolado y Jesús Ibáñez, junto con Alfredo Lantarón del CSN, formaron el equipo de proyecto del ejercicio de juicio de expertos. Es importante tener en cuenta que en España no se conocen aplicaciones de juicio de expertos, por lo que este equipo y cualquier otro que pudiera haberse formado no puede aportar ninguna experiencia práctica en la aplicación de técnicas de juicio de expertos. Los analistas han sido Ricardo Bolado y Jesús Ibáñez. Ricardo Bolado es físico, profesor de estadística e investigador senior de CTN-UPM con un conocimiento previo sobre técnicas de juicio de expertos en el área de los almacenamientos geológicos profundos de residuos radiactivos de alta actividad, mientras que Jesús Ibáñez es ingeniero industrial e investigador junior de CTN-UPM con experiencia previa en el manejo de códigos de nivel 3 para el APS. Alfredo Lantarón, coordinador por parte de CSN del acuerdo específico CSN/CTN-UPM, es físico y ha actuado como generalista, puesto que posee una dilatada experiencia en temas de seguridad nuclear adquirida a través de su actividad profesional, primero en diversas ingenierías y posteriormente en el Consejo de Seguridad Nuclear.

Una vez recibida la documentación anterior, suministrada por la organización del proyecto BE-EJT's, el equipo de proyecto realizó la fase 2 de la metodología de juicio de expertos, la definición y estudio del problema a evaluar. El objetivo global de esta fase fue establecer el estado actual de los estudios sobre el comportamiento del hidrógeno en contención con el fin de poder determi-

nar las características principales del ejercicio de juicio de expertos que se iba a realizar. Para ello se seleccionaron varias fuentes de información que sirvieron para conformar el análisis de la siguiente sección C.1.1 ^[3, 4, 5, 6].

C.1.1. El estudio del comportamiento del hidrógeno en contención

Para estudiar la eventualidad de la combustión del hidrógeno en contención es necesario realizar tres pasos principales que consisten en la definición del modelo de planta a utilizar, la simulación de la distribución y mezclado en contención y la evaluación de las condiciones de inflamabilidad y regímenes de combustión.

El principal interrogante en la generación de un modelo de planta es el nivel de complejidad y detalle que se necesita para el tipo de estudio que se quiere realizar. La fase de distribución de un accidente severo requiere una resolución espacial y temporal que puede variar en algunos órdenes de magnitud, entre 10^{-1} y 10^2 m y entre 10^1 y 10^4 s para poder representar adecuadamente los diferentes elementos y procesos (contención, compartimentos, generación de hidrógeno, convección, transmisión de calor, etc.). La inclusión de la fase reactiva después de la ignición añade escalas mucho más pequeñas y rápidas, entre 10^{-4} y 10^{-1} m y entre 10^{-8} y 10^1 s para tener en cuenta fenómenos tales como el quemado local, el transporte de energía y la turbulencia de la llama o las reacciones elementales. Por lo tanto la calidad de los cálculos proporcionados por los códigos para ambas fases, las de distribución y quemado, depende fuertemente de la malla espacio-temporal utilizada. Sin embargo, las limitaciones actuales en el cálculo computacional permiten una resolución espacial máxima de 1 m y una resolución temporal máxima entre 10^{-1} y 10^{-3} s. De este modo resulta que para las reacciones químicas y procesos de transporte local más rápidos se hace necesario desarrollar modelos físicos apropiados.

Conociendo las tasas del hidrógeno y vapor que se liberan a la contención la siguiente cuestión importante es cómo se distribuyen y mezclan estos gases con el aire de la contención, es decir, es necesario conocer la composición de la mezcla hidrógeno/vapor/aire como función del espacio y del tiempo. La distribución de los gases depende tanto del modo de liberación del hidrógeno y vapor como de las características propias de la planta, por ejemplo el volumen total, la localización de la emisión, la compartimentalización, la disponibilidad de sistemas de mezclado y enfriamiento o los sumideros de calor locales o generalizados. Hoy día se dispone de varios códigos de computación para estudiar el problema de la distribución del hidrógeno. Los códigos de parámetros agrupados (lumped-parameter codes) están diseñados para calcular las concentraciones de gas en volúmenes de control (típicamente entre 30 y 80 para una contención completa) que están conectados entre sí mediante uniones de flujo. La técnica de resolución que emplean estos códigos se basa en la integración numérica (para una determinada resolución espacial) de un sistema de ecuaciones algebraicas. Ejem-

plos de este tipo de código son CONTAIN, MAAp, MELCOR, RALOC o RELAP. Los principales inconvenientes de los códigos de parámetros agrupados son la falta de capacidad para modelar variaciones locales de campo en 2-D o 3-D (por ejemplo turbulencias locales) y la resolución espacial insuficiente, que provoca sobreestimaciones de la homogeneización en grandes volúmenes. No obstante, esta aproximación es particularmente atractiva para modelar la distribución y transporte del hidrógeno en contenciones complejas con muchos compartimentos.

La inhomogeneidad es un aspecto muy importante del comportamiento del hidrógeno, puesto que pueden existir grandes diferencias entre las reactividades de una atmósfera bien mezclada y de una atmósfera estratificada. Para resolver este fenómeno con suficiente precisión es esencial disponer de una buena resolución espacial, para lo cual se han desarrollado diversos códigos (códigos CFD) tales como GASFLOW, CFX, FLUTAN, FLUENT, PHOENICS o TRIO-VF. En esencia estos códigos resuelven la ecuación de Navier-Stokes discretizándola en un esquema de diferencias finitas. Los códigos CFD han demostrado una gran capacidad predictiva, en particular cuando se estudian problemas con pocos compartimentos, lo cual demanda grandes tiempos de computación, no siempre disponibles, y con una buena selección de las condiciones de contorno, a las que son muy sensibles.

Un aspecto particularmente importante en el uso de códigos de computación es el de las incertidumbres en los modelos. Ningún código está libre de estas incertidumbres, la naturaleza de las cuales depende del tipo de código. En general las incertidumbres en los modelos surgen por una falta de resolución en el estudio de los flujos, el modelado de la turbulencia y sus esfuerzos asociados y una simplificación o incluso falta de tratamiento de otros procesos o efectos (por ejemplo la idealización de la forma de las superficies). Otra fuente importante de incertidumbres surge del llamado efecto usuario. Existen diversos modos mediante los cuales un usuario de un código de computación puede influir en los resultados del mismo, por ejemplo el sistema de nodalización utilizado o las opciones y parámetros del código seleccionados.

Para que tenga lugar un quemado sustancial del hidrógeno es necesario que exista una mezcla gaseosa inflamable y una fuente de ignición suficientemente energética. Los siguientes rangos de fracción molar de hidrógeno, obtenidos por experimentación, son necesarios para que se propague una llama en una atmósfera aire/hidrógeno en condiciones ambiente:

<i>Concentración de hidrógeno en aire seco</i>	<i>Suceso</i>
0% - 4%	No inflamable (Inerte)
4% - 14%	Deflagración
14% - 70%	Deflagración / Detonación
70% - 74%	Deflagración
74% - 100%	No inflamable (Inerte)

Estos límites de inflamabilidad son una útil guía para analizar el potencial de combustión de una mezcla gaseosa, aunque existen serias dudas sobre la influencia de la geometría de la contención y la turbulencia en el régimen de combustión.

Estos rangos de concentración se pueden ver modificados con la adición de especies gaseosas a la mezcla básica aire/hidrógeno. En particular, la presencia de vapor es muy importante cuando se evalúa la combustión del hidrógeno puesto que el mismo está presente, en mayor o menor concentración, en todos los escenarios accidentales. Los límites de inflamabilidad para mezclas aire/hidrógeno/vapor se representan en el bien conocido diagrama de Shapiro-Moffette (este diagrama se reproduce en el apéndice D de este documento). La concentración de vapor variará en el curso de un accidente debido a fenómenos tales como la condensación sobre superficies o inducida por aspersores o el calentamiento directo de la contención. Estos fenómenos se deberían tener en mente cuando se evalúa el potencial de amenaza del hidrógeno puesto que una rápida disminución de la concentración de vapor puede desplazar una mezcla gaseosa inerte a condiciones de inflamabilidad o incluso de detonación.

Las fuentes de ignición se pueden clasificar en aleatorias y deliberadas (ignitores). Cuando los ignitores se incluyen en el análisis es posible determinar el momento y la localización de una combustión de hidrógeno, la cual se producirá cuando la mezcla aire/hidrógeno/vapor que está situada en el entorno de los ignitores alcance condiciones de inflamabilidad. Cuando no existe ignición deliberada el momento y localización de las combustiones no es predecible. Durante un accidente severo pueden existir un cierto número de potenciales fuentes de ignición: autoignición por alta temperatura, radiólisis del vapor por los productos de fisión, superficies calientes, equipo eléctrico, recombinadores sobrecargados, partículas calientes, descargas de electricidad estática, etc. La ignición aleatoria de una mezcla inflamable no se puede excluir en el análisis de un accidente severo, puesto que la energía necesaria para provocar la ignición es excepcionalmente pequeña (décimas de milijulio para mezclas ricas en hidrógeno, aunque la adición de diluyentes puede incrementar este valor sustancialmente).

Los regímenes de combustión se clasifican según la velocidad de la llama en deflagraciones (aproximadamente 10 m/s para deflagraciones lentas) y detonaciones (aproximadamente 2.000 m/s). Las energías mínimas que se necesitan para inducir una detonación directa son muy grandes, aproximadamente 4.100 J para detonaciones estables, la cual es unos ocho órdenes de magnitud mayor que la energía mínima de ignición necesaria para la propagación de una deflagración. Por lo tanto una situación mucho más probable es la detonación iniciada a partir de una deflagración turbulenta (*deflagration to detonation transition*, DDT). La geometría y el tamaño de la mezcla inflamable, la composición de la misma, la presencia de obstáculos y las características de la fuente de ignición son factores que juegan un importante papel en el fenómeno de la DDT. Para predecir el potencial de fenómenos DDT es necesario recurrir a la simulación numérica, aunque actualmente no parece factible la aplicación a escala de contención completa de los códigos existentes para tal fin.

C.1.2. Características del ejercicio de juicio de expertos

Del análisis anterior, y teniendo en cuenta los datos proporcionados por la organización del proyecto BE-EJTs, se alcanzaron las dos siguientes conclusiones sobre el alcance del ejercicio de juicio de expertos:

- El nivel de detalle de los datos geométricos de la contención era suficiente como para realizar un modelo de planta para su uso con códigos de parámetros agrupados. Por el contrario el uso de códigos CFD requeriría, aparte de grandes recursos computacionales, un mayor nivel de detalle sobre las características geométricas de la contención.
- Para tratar las principales incertidumbres de los modelos y el efecto usuario se podría recurrir a los análisis de sensibilidad e incertidumbre, lo cual sin embargo podría requerir amplias disponibilidades de tiempo.

Cuando se revisaron las cuestiones propuestas por la organización del proyecto BE-EJTs se notaron ambigüedades tanto en lo referente al término combustión como en las fuentes de ignición a considerar en cada caso. Por lo tanto el equipo de proyecto decidió redefinir las cuestiones del siguiente modo:

1. Distribución para la probabilidad de que se produzca al menos una combustión (deflagración o detonación) dentro del IRWST debido a fuentes de ignición internas entre 0 y 1.000 segundos (suceso Q_1).
2. Distribución para la probabilidad de que se produzca al menos una combustión (deflagración o detonación) dentro del IRWST debido a la propagación de llamas provenientes de los habitáculos inferiores de la contención entre 0 y 1000 segundos (suceso Q_2).
3. Distribución para la probabilidad de que se produzca al menos una detonación dentro del IRWST debido a fuentes de ignición internas o a la propagación de llamas provenientes de los habitáculos inferiores de la contención entre 0 y 1.000 segundos (suceso Q_3).

Otro aspecto importante que surgió del análisis de estas definiciones es la necesidad de evaluar una distribución de probabilidad para una probabilidad, que es una magnitud no observable. Este tipo de cuestiones plantean el problema de la calibración de los expertos, puesto que una misma definición cualitativa de un fenómeno puede dar lugar a diferentes cuantificaciones en términos de probabilidad. Los procedimientos que existen para tratar esta dificultad (clasificaciones pareadas) presentan otra serie de dificultades, y dado el carácter de aplicación piloto de este ejercicio el equipo de proyecto decidió obviar la cuestión de la calibración. Por lo demás en el informe NUREG-1150 también se recurrió a este tipo de cuestiones ^[7].

La parte final de la etapa de definición y estudio se dedicó a revisar algunas formas de descomposición. Para ello se utilizaron los ejercicios de juicio de expertos correspondientes a la combustión del hidrógeno del informe NUREG-1150, en concreto los de las plantas de Grand Gulf, Sequoyah y Peach Bottom ^[7]. Para analizar los fenómenos de combustión las variables de menor nivel que se utilizan típicamente son la concentración de hidrógeno, la presencia de fuentes de ignición y el grado de mezclado de la atmósfera. Como se indicó anteriormente, para que ocurra una combustión es necesario que exista mezcla inflamable y que existan fuentes de ignición suficientemente energéticas. La inflamabilidad de la mezcla depende en gran medida, además de su grado de inertización, del mayor o menor mezclado de la atmósfera. Las atmósferas bien mezcladas impiden las acumulaciones locales de hidrógeno, de modo que la probabilidad de que se den condiciones inflamables en las mismas es menor.

C.1.3. Selección de los expertos

Dado el carácter de aplicación piloto de este ejercicio no se pudo contar con suficientes recursos para hacer una amplia selección de expertos, siguiendo el procedimiento descrito en la sección B. Por lo tanto fue necesario limitarse a hacer una búsqueda entre las instituciones españolas involucradas en el proyecto BE-EJTs, que han sido CTN-UPM y UNESA. Con el fin de contar con expertos de diferentes instituciones se decidió también solicitar la participación del CIEMAT. Tras algunas conversaciones UNESA declinó la invitación a participar, mientras que CTN-UPM aportó dos expertos y el CIEMAT uno. Desafortunadamente cuando la aplicación estaba en su quinta etapa el experto del CIEMAT renunció a continuar debido a razones profesionales, por lo que finalmente sólo se pudo contar con dos expertos.

Los expertos de CTN-UPM son Miguel Angel Jiménez y Juan Manuel Martín-Valdepeñas. Ambos poseen más de tres años de experiencia sobre el tema del comportamiento del hidrógeno en contención. Miguel Angel Jiménez es físico e investigador senior de CTN-UPM, donde actualmente está realizando su tesis doctoral. Tiene amplia experiencia en el uso del código MELCOR y ha participado en los siguientes proyectos sobre el hidrógeno:

- “Comportamiento del hidrógeno en contención”, patrocinado por el CSN.
- “V&V Methodology for Hydrogen Mixing, Catalytic Recombination and Deliberate Combustion”, EC’s Fourth Framework Programme on Nuclear Fission Safety (Contract FI4S - CT96-0022).
- “Improved Modelling of Turbulent Hydrogen Combustion and Catalytic Recombination of Hydrogen Mitigation”, EC’s Fourth Framework Programme on Nuclear Fission Safety (Contract FI4S-CT96-0017).
- “Hydrogen Project”, EC’s Third Framework Programme on Nuclear Fission Safety (Contract FI4S-CT92-0003).

Por su parte, Juan Manuel Martín-Valdepeñas es ingeniero industrial e investigador junior de CTN-UPM, donde también actualmente está realizando su tesis doctoral. Posee experiencia en el uso de los códigos MELCOR y CFX y ha participado en los siguientes proyectos sobre el hidrógeno:

- “MELCOR 1.8.3 Code Assessment with NUPEC M-7-1 Hydrogen Mixing and Distribution Test (ISP-35)”, patrocinado por el CSN.
- “Comportamiento del hidrógeno en contención”, patrocinado por el CSN.
- “V&V Methodology for Hydrogen Mixing, Catalytic Recombination and Deliberate Combustion”, EC’s Fourth Framework Programme on Nuclear Fission Safety (Contract FI4S-CT96-0022).
- “Improved Modelling of Turbulent Hydrogen Combustion and Catalytic Recombination of Hydrogen Mitigation”, EC’s Fourth Framework Programme on Nuclear Fission Safety (Contract FI4S-CT96-0017).

C.2. Entrenamiento

La sesión de entrenamiento se estructuró en cuatro partes en las que se abordaron cuestiones relativas al ejercicio de juicio de expertos, la teoría de probabilidades, los sesgos y la calibración. Los contenidos específicos de cada parte fueron los siguientes:

- 1ª Parte. El propósito del juicio de expertos:
 - Objetivo del ejercicio.
 - Justificación de la necesidad de la opinión de los expertos.
 - Naturaleza y uso de las opiniones a emitir.
- 2ª Parte. Los fundamentos de la teoría de probabilidades y estadística:
 - Espacio muestral, sucesos, probabilidad de un suceso y axiomas de Kolmogorov.
 - Interpretación de la probabilidad (clásica, frecuentista y bayesiana).
 - Sucesos mutuamente excluyentes y sucesos independientes.
 - Fórmula de Bayes.
 - Funciones de densidad y de distribución de probabilidad.
- 3ª Parte. Los sesgos en la estimación subjetiva de probabilidades:
 - Definición clara y precisa de las cuestiones.
 - Descomposición.
 - Fiabilidad e independencia de las fuentes de información.
 - Mecanismos heurísticos de inferencia: representatividad, disponibilidad y anclaje y ajuste.

- 4ª Parte. Calibración:
 - Sobreconfianza.
 - Calibración de los expertos.
 - Ejercicio práctico de calibración.

Por otra parte el equipo de proyecto decidió no explicar en esta fase de entrenamiento los métodos de análisis de sensibilidad e incertidumbre debido a la presumible falta de tiempo que habría durante el ejercicio de juicio de expertos para realizar los mismos de una forma completa y consistente. Como se dijo anteriormente estas técnicas podrían ser necesarias para tratar adecuadamente las incertidumbres en los cálculos de los códigos, por lo que las mismas se podrían explicar a los expertos más adelante en el caso de que así se solicitase.

C.3. Periodo de estudio

Tras la sesión de entrenamiento se realizó una sesión de presentación del tema (fase 5) y se abrió un periodo de estudio y realización de cálculos, que duró aproximadamente dos meses, que finalizó con otra sesión conjunta en la que los expertos explicaron sus aproximaciones al tema y sus principales conclusiones (fase 6). Los documentos de posición de los expertos se pueden encontrar en las referencias ^[8] y ^[9], y se reproducen, actualizados en su traducción a lengua española, en este mismo documento como anexos D y E respectivamente.

La sesión de presentación del tema se estructuró en tres partes dedicadas a la revisión y comentario del escenario a evaluar, al repaso de la definición de las cuestiones y a la discusión de los posibles modos de abordar el problema. A fin de facilitar el desarrollo de la reunión antes de la misma se envió a los expertos copias de la documentación proporcionada por la organización del proyecto BE-EJTs y de los ejercicios de juicio de expertos referentes a la combustión del hidrógeno del informe NUREG-1150 ^[2] y ^[7].

Durante la revisión del escenario a evaluar no surgieron dudas sobre el escenario accidental seleccionado ni sobre las condiciones iniciales a considerar, pero sí se notaron ambigüedades en varios datos geométricos, de modo que se adoptaron interpretaciones comunes para algunos de ellos. Para otros, en concreto los referentes a la disposición de conductos y tuberías de ventilación en las proximidades de las aberturas del IRWST, en los habitáculos inferiores de la contención, y al tipo de estructura separadora que existía en el nivel 5.19 m, la interpretación se hizo muy difícil y se acordó solicitar aclaraciones a la organización del proyecto BE-EJTs. Posteriormente esta organización informó que en el nivel 5.19 m la estructura de separación era una rejilla metálica que permitía el paso de los gases, mientras que no proporcionó nueva información sobre la disposición de los mencionados conductos y tuberías de ventilación.

Los expertos aceptaron la definición de las cuestiones propuestas por el equipo de proyecto y a este respecto la discusión se centró en la necesidad de evaluar la distribución de probabilidad para una probabilidad, lo cual puede suponer un mayor esfuerzo de abstracción por parte de los expertos sin poder eliminar, por otra parte, la posibilidad de la presencia de problemas de calibración. Para evitar este tipo de dificultad se sugirió, tal y como se hizo en varios de los ejercicios de juicio de expertos realizados para el informe NUREG-1150, sustituir el término “probabilidad” por “frecuencia”, que es un concepto más próximo a la experiencia cotidiana. Sin embargo, dada la diferente naturaleza de ambos conceptos y a fin de no introducir elementos ajenos al planteamiento inicial del problema, se creyó finalmente más oportuno mantener el término original de “probabilidad”.

En la última parte de la sesión de presentación del tema el equipo de proyecto expuso el análisis de la sección C.1.1. Los expertos aportaron comentarios de carácter general a dicho análisis y estuvieron de acuerdo en considerar el modelo de planta y el tipo de código como los factores más importantes para una correcta evaluación del peligro de combustión del hidrógeno en cualquier escenario accidental. A fin de no duplicar información y poder complementar los análisis de ambos expertos se sugirió la idea de que cada experto realizase cálculos de distribución con códigos de diferente naturaleza. De este modo se acordó que el experto A (Miguel Angel Jiménez) utilizaría el código MELCOR con una nodalización de planta completa, mientras que el experto B (Juan Manuel Martín-Valdepeñas) analizaría el problema con el código CFX, aunque centrando la atención sólo en el IRWST y los habitáculos inferiores de la contención debido al considerable tiempo de computación que requieren los cálculos con códigos CFD.

También se discutieron diferentes modos de descomposición de las cuestiones a evaluar, aunque no se adoptó ningún esquema en particular y se decidió que en la siguiente fase de estudio individual cada experto adoptaría aquella desagregación que considerase más adecuada. Por último se animó a los expertos a que confeccionasen sus propias listas de bibliografía que consideraban relevantes para el estudio del problema del hidrógeno en contención. Estas listas fueron las siguientes:

- Experto A:
 - Marshall, B W, *Flammability Limits and Combustion Characteristics of H₂/Air/Steam at Intermediate Scale*, SNL, SAND86-0579C (1986).
 - *Flame Acceleration and Transition to Detonation in H₂/Air/Diluent Mixtures*, NEA/CSNI, NEA/CSNI/R(92)3 (1992).

- *Hydrogen Management Techniques in Containment*, NEA/CSNI, NEA/CSNI/R(92)3 (1992).
- Breitung, W, *et al.*, *A Mechanistic Approach to Safe Igniter Implementation for H₂ Mitigation*, OCDE Workshop, Canadá 13-15 Mayo (1996).
- Fernández, J L, *Fenómenos de combustión del H₂ en accidentes nucleares severos*, CIEMAT, ITN/SN-12/II-96 (1996)
- Hontañón, E, *et al.*, *Transport Phenomena in the Containment. State-of-the-Art Models in MELCOR 1.8.3 and CONTAIN 1.12x Codes*, CTN-UPM, CTN 27/96 (1996)
- Rohde, J, *et al.*, *Investigations for the Implementation of Catalytic Recombiners in Large-Dry Containments in Germany*, OCDE Workshop, Canadá 13-15 Mayo (1996).
- Royl, P, *et al.*, *Analysis of Mitigating Measures during Steam/H₂ Distributions in Nuclear Reactor Containments using 3D Field Code GASFLOW*, OCDE Workshop, Canadá 13-15 Mayo (1996).
- Experto B:
 - Renson, C, *et al.*, *Stratification d'Helium dans une Enceinte. Premiers Resultats des Essais Isothermes*, CEA, DEMA/87/127 (1987).
 - Wolf, L, *Comparisons Between HDR H₂ Distribution Experiments E11.2 and E11.4*, NRC, NUREG/CP-0119 Vol2 (1991).
 - Gauvain, J, *Review of Containment Thermal-Hydraulic Codes in Preparation to MISTRA Project*, CEA, DMT.94/665 (1994)
 - Breitung, W, *et al.*, *Activities at FzK in 1994/1995 for the Investigation of H₂ Distribution and Combustion Phenomena in LWR Core Melt Accidents*, FzK, H2(95)-D37 (1995).
 - Mohaved, *Recombiner Model for Lumped Parameter Codes (WAVCO). Validation and Applications*, Siemens-KWU, H2(95)-D27 (1995).

• Expertos A y B:

- CAMP, A L, *et al.*, *Light Water Reactor Hydrogen Manual*, NRC, NUREG/CR-2726 (1983).
- Sherman, M P, *et al.*, *The Possibility of Local Detonations during Degraded-Core Accidents in the Bellefonte Nuclear Power Plant*, NRC, NUREG/CR-4803 (1987).
- *International Standard Problem 29. Distribution for H₂ within the HDR Containment under Severe Accident Conditions. Final Comparison Report*, NEA/CSNI, NEA/CSNI/R(93)4 (1993).
- *Final Comparison Report on ISP-35: NUPEC H₂ Mixing and Distribution Test (Test M-7-1)*, NEA/CSNI, NEA/CSNI/R(94)29 (1994).
- Dorofeev, S B, *Turbulent Combustion and DDT Events as an Upper Bound for H₂ Mitigation Techniques*, OCDE Workshop, Canadá 13-15 Mayo (1996).
- Jiménez, M A, *et al.*, *Revisión de los códigos de parámetros promediados y CFD en cuanto a modelos de distribución y combustión del hidrógeno en la contención*, CTN-UPM, CTN 30/96 (1996).
- Martín-Valdepeñas, J M, *et al.*, *Evaluación crítica de los PARs como estrategia de control y mitigación de H₂ en contenciones PWR*, CTN-UPM, CTN 35/96 (1996).
- Martín-Valdepeñas, J M, *et al.*, *Revisión de experimentos de mezcla y distribución de hidrógeno en contención*, CTN-UPM, CTN 20/96 (1996).

C.3.1. Análisis del experto A

Para realizar su modelo de planta el experto A tuvo en cuenta toda la información proporcionada por la organización del proyecto BE-EJTs. No obstante, tuvo que realizar suposiciones adicionales, por ejemplo respecto a las estructuras de la contención capaces de actuar como sumideros de calor y los gradientes de presión en la atmósfera de la contención. Así mismo el experto tuvo que asumir ciertas restricciones para algunas condiciones iniciales y condiciones de liberación del hidrógeno para adecuarlas a las necesidades del código MELCOR.

Con la nodalización así definida y las condiciones iniciales ajustadas, el experto realizó un primer cálculo base utilizando el modelo de crecimiento de burbuja SPARC del código MELCOR 1.8.3 para simular la emisión del hidrógeno y vapor en la fase líquida del IRWST a través de los burbujeadores. En este primer cálculo sólo se simularon fenómenos de distribución, pero no de combustión. Los principales resultados de este cálculo fueron:

- Los habitáculos inferiores de la contención, donde están situados los ignitores, alcanzan condiciones de inflamabilidad muy rápidamente en la secuencia propuesta de 1.000 s.
- La atmósfera del IRWST permanece inerte y lejos de alcanzar condiciones de inflamabilidad durante toda la secuencia debido a un alto contenido de vapor y una escasez de oxígeno.
- No obstante, en uno de los dos sectores de la atmósfera del IRWST se establece un lazo de convección con los habitáculos inferiores de la contención a través de las aberturas del IRWST. Este lazo de convección, que ocurre aproximadamente al final de la secuencia, introduce en el IRWST aire con alto contenido de oxígeno proveniente de los habitáculos inferiores de la contención, con lo que se pueden alcanzar condiciones de inflamabilidad.

La situación descrita dentro del IRWST cae claramente en la zona de mezclas muy ricas en vapor y pobres en oxígeno, por lo que una primera conclusión podría ser que la combustión del hidrógeno en el IRWST se puede considerar un suceso altamente improbable. No obstante existen ciertos aspectos del problema que están sometidos a incertidumbre y que se deberían tener en cuenta. Por ejemplo la condensación del vapor dentro del IRWST podría ser mayor de la predicha por el código, con lo que se podrían alcanzar más fácilmente condiciones de inflamabilidad.

Una segunda serie de cálculos se dedicaron a comprobar la aparición del lazo de convección mencionado y a estudiar la eficiencia de los ignitores. La existencia del lazo de convección se comprobó mediante el uso de diferentes nodalizaciones de planta, y tras verificar la presencia del mismo en todos los casos el experto lo aceptó definitivamente como un suceso que se podría dar con alta probabilidad en una situación real. Los cálculos de combustión, que se realizaron con el modelo MELCOR BUR y utilizando diferentes eficiencias para los ignitores, mostraron una alta tasa de igniciones intencionadas en las salas inferiores de la contención, con lo que la entrada de llamas en el IRWST se podría considerar como un suceso probable.

C.3.2. Análisis del experto B

El experto B utilizó el código CFX para estudiar con gran detalle la distribución y mezclado de los gases en uno de los sectores de la atmósfera del IRWST y sus correspondientes aberturas y habitáculos inferiores de la contención. Para este estudio se utilizaron 2.800 nodos y se simularon con

gran detalle las aberturas. Las condiciones de contorno necesarias para este cálculo se obtuvieron de un cálculo previo con MELCOR a base de una sencilla nodalización de planta con cinco volúmenes de control.

El resultado más importante mostrado por CFX es la alta fracción másica de vapor en la atmósfera del IRWST, siempre mayor que 0.60, por lo que la misma debe permanecer inerte. La fracción másica de hidrógeno también es muy alta, en torno a 0.40 en la mayor parte de la atmósfera. Esta situación podría ser peligrosa en el caso de que se diesen fracciones másicas de vapor mucho menores que las predichas por el código, lo cual no se puede despreciar dada la falta de modelo de condensación del código CFX. Además, la forma bastante aproximada en que se calcularon las condiciones de contorno introducen nuevas incertidumbres en este escenario.

En la sesión de presentación de resultados el experto B mostró su creencia de que su representación incompleta de la geometría de la planta podría influir de forma apreciable en los resultados obtenidos, puesto que los procesos termohidráulicos en la parte superior de la contención no fueron tenidos en cuenta. Por ejemplo estos procesos podrían ser los causantes del establecimiento de los lazos de convección entre los habitáculos inferiores de la contención y la atmósfera del IRWST, fenómeno mostrado en los resultados del experto A. Es por ello que el experto B decidió, tras esta sesión, realizar un nuevo cálculo con CFX pero forzando a partir de los 700 s la presencia de un lazo de convección con el fin de estimar las consecuencias de los eventuales procesos de venteo de la atmósfera del IRWST que se podrían dar en la realidad. En este cálculo se mostró que la fracción másica de vapor podía descender hasta 0.3 en algunas zonas de la atmósfera del IRWST y la de hidrógeno hasta 0.1, condiciones bajo las cuales no se consigue la inertización de la atmósfera.

C.4. Evaluaciones de los expertos

La fase 7 de la metodología está dedicada a la obtención de las evaluaciones formales de los expertos. Las sesiones para la obtención de las opiniones de los expertos se estructuraron en dos partes, una primera para definir los árboles de sucesos para descomponer las cuestiones y una segunda para evaluar las probabilidades de los sucesos de esos árboles.

C.4.1. Experto A

La figura C.1 muestra el árbol de sucesos definido por el experto A, el cual está basado en el siguiente razonamiento: la combustión del hidrógeno solamente puede ocurrir cuando existen simultáneamente mezclas en condiciones de inflamabilidad y fuentes de ignición suficientemente energéticas. La probabilidad de existencia de mezclas inflamables en la atmósfera del IRWST depende

fundamentalmente de la presencia o no de procesos de venteo de la misma, por ejemplo lazos de convección, por lo que es importante distinguir entre la presencia o no de dichos procesos de venteo. El experto consideró que el único modo de que se produjesen detonaciones era a través de procesos DDT, puesto que las detonaciones directas son imposibles debido a que requieren de la presencia de fuentes de ignición muy energéticas.

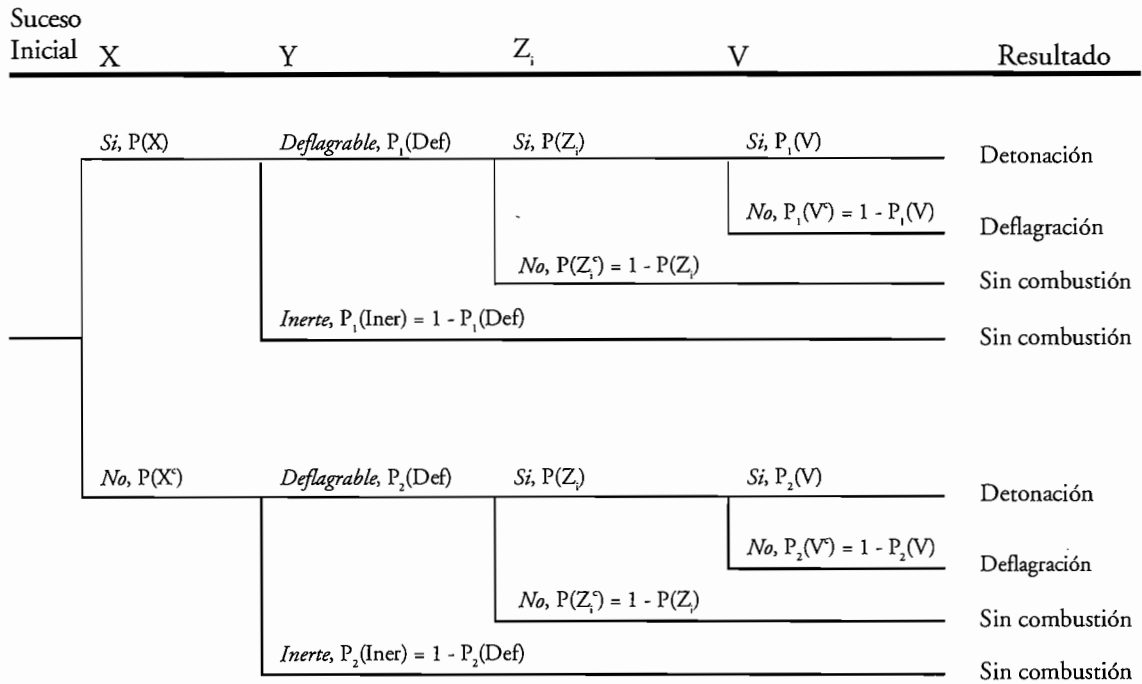


Figura C.1. Árbol de sucesos del experto A.

La definición de los sucesos del árbol es la siguiente:

- X: Existen procesos de recirculación entre la atmósfera del IRWST y los habitáculos inferiores de la contención entre 0 y 1.000 s.
- Y: Tipos de mezclas en la atmósfera del IRWST entre 0 y 1.000 s. Y indica la existencia de uno de dos sucesos complementarios; o bien existe mezcla deflagrable (engloba a la mezcla detonable) en el IRWST, o bien la mezcla es inerte. Las mezclas deflagrables y detonables están definidas según los límites de inflamabilidad y detonabilidad del diagrama de Shapiro-Moffette.
- Z_i: Existen fuentes de ignición suficientemente energéticas dentro del IRWST entre 0 y 1.000 s (i=1) o llamas intencionadas en los habitáculos inferiores de la contención que pueden pasar a la atmósfera del IRWST a través de las aberturas entre 0 y 1.000 s (i=2).
- V: Se producen procesos DDT en la atmósfera del IRWST entre 0 y 1.000 s.

Los subíndices 1 y 2 que aparecen en algunas probabilidades del árbol se utilizan para diferenciar si se está en la rama inferior o superior del mismo (correspondientes respectivamente a que existan $-X$ o $-X^c$ -no procesos de recirculación). Esta distinción es necesaria pues probabilidades como la del suceso ‘existe mezcla deflagrable en el IRWST’ es diferente cuando se produce recirculación ($P_1(Def)$) y cuando no se produce ($P_2(Def)$).

Este árbol de sucesos se utiliza para evaluar las tres cuestiones propuestas, en términos de los tres sucesos de interés según se definieron como Q_1 , Q_2 , y Q_3 en el apartado C.1.2:

$$P(Q_1) = P(X) \cdot P_1(Def) \cdot P(Z_1) + P(X^c) \cdot P_2(Def) \cdot P(Z_1), \quad (1)$$

$$P(Q_2) = P(X) \cdot P_1(Def) \cdot P(Z_2) + P(X^c) \cdot P_2(Def) \cdot P(Z_2), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P(Q_3) &= P(Q_{31} \cup Q_{32}) = P(Q_{31}) + P(Q_{32}) - P(Q_{31} \cap Q_{32}) \approx \\ &\approx P(X) \cdot P_1(Def) \cdot P(Z_1) \cdot P_1(V) + P(X^c) \cdot P_2(Def) \cdot P(Z_1) \cdot P_2(V) + \\ &+ P(X) \cdot P_1(Def) \cdot P(Z_2) \cdot P_1(V) + P(X^c) \cdot P_2(Def) \cdot P(Z_2) \cdot P_2(V) \end{aligned} \quad (3)$$

En la expresión (3) se introducen los sucesos Q_{31} y Q_{32} . Introducir estos dos sucesos en el análisis responde a la necesidad de considerar que el suceso Q_3 (detonación en el IRWST) puede producirse tanto cuando existe proceso de recirculación como cuando no existe éste (los subíndices 1 y 2 tienen por tanto el significado comentado dos párrafos más arriba). La intersección entre los sucesos Q_{31} y Q_{32} se consideró con probabilidad despreciable.

Para cuantificar el árbol de sucesos se sugirió utilizar distribuciones de probabilidad para el valor de aquellas probabilidades sometidas a mayor incertidumbre y sólo estimaciones puntuales para el resto de las probabilidades. Además, para las distribuciones de probabilidad se acordó utilizar distribuciones beta o logarítmico - normal debido a sus buenas características para representar la distribución de variables aleatorias con rango de variación comprendido entre 0 y 1. Para obtener estas distribuciones se pidió al experto una mejor estimación que se tomó como media de la distribución y dos cuantiles, con lo cual se determinó la distribución que mejor se ajustaba.

Para la probabilidad de presencia de procesos de venteo, $P(X)$, el experto evaluó una distribución beta con parámetros $\alpha = 10.00$ y $\beta = 2.00$, $\mu = 5/6$ (figura C.2). Dos fueron las razones aportadas por el experto para estos valores, tanto la presencia de una alta tasa de igniciones intencionadas en los habitáculos inferiores de la contención, que podrían empujar el aire hacia la atmósfera del IRWST a través de las aberturas, como los propios lazos de convección que aparecieron en sus cálculos con el código MELCOR.

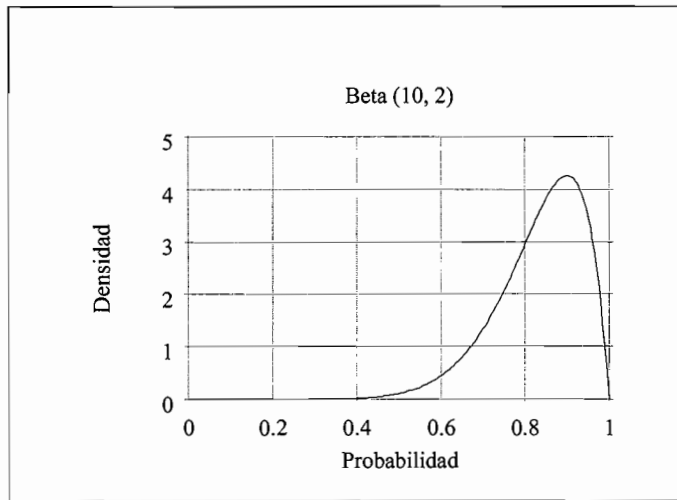


Figura C.2. Función de densidad de probabilidad del experto A para $P(X)$.

El experto creía que la probabilidad $P(Z_1)$ para la existencia de fuentes de ignición dentro del IRWST debía de ser muy pequeña puesto que no existen equipos eléctricos en el mismo. Aparte de las partículas calientes no se identificaron otras fuentes de ignición creíbles y para aquellas el experto creía que deberían ser muy pequeñas dadas las condiciones de emisión propuestas, con lo que su capacidad para actuar como fuentes de ignición sería muy limitada. El experto evaluó una distribución log-normal de parámetros $\mu = 3.50 \cdot 10^{-4}$ y $\sigma = 3.30 \cdot 10^{-4}$ (figura C.3).

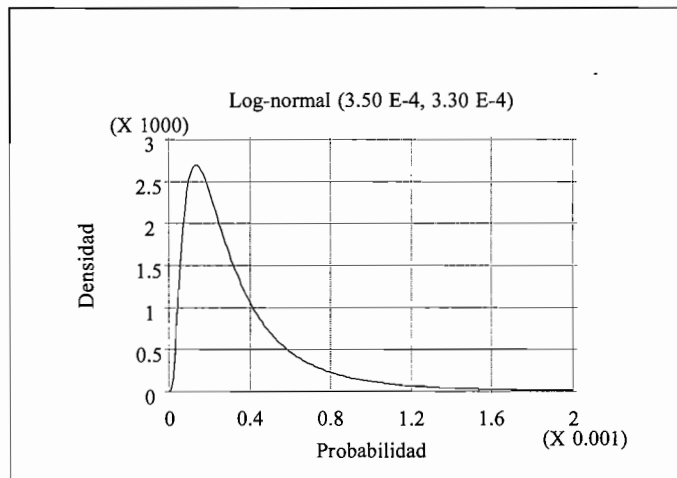


Figura C.3. Función de densidad de probabilidad del experto A para $P(Z_1)$.

Por el contrario el experto asignó altos valores a la probabilidad $P(Z_2)$ para la existencia de llamas intencionadas en los habitáculos inferiores de la contención que podrían pasar a la atmósfera del IRWST a través de las aberturas, debido a la alta tasa de tales igniciones que mos-

tró el código MELCOR. Para esta probabilidad se evaluó una distribución beta con parámetros $\alpha = 3.00$ y $\beta = 1.20$ (figura C.4).

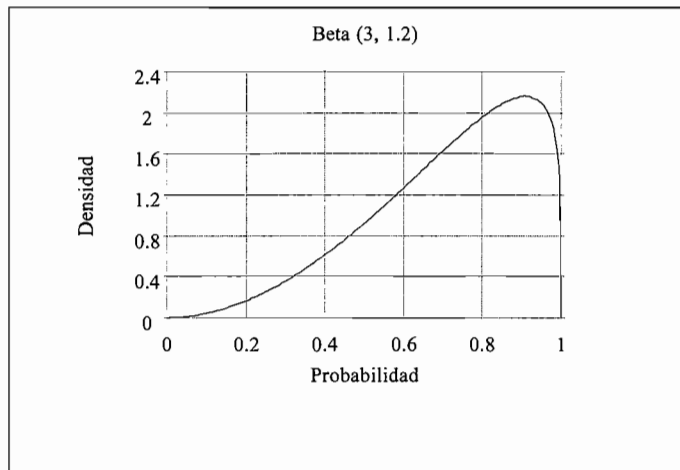


Figura C.4. Función de densidad de probabilidad del experto A para $P(Z_2)$.

Teniendo en cuenta los resultados de sus cálculos, el experto juzgó que cuando existen procesos de venteo la secuencia propuesta de 1.000 s es suficiente sólo para generar mezclas inflamables en el IRWST, pero no detonables, de modo que evaluó $P_1(Def) = 0.95$ y $P_1(V) = 5.00 \cdot 10^{-5}$. Sin embargo, cuando no existen procesos de venteo la falta de aire impide la combustión de las mezclas de modo que el experto evaluó $P_2(Def) = 10^{-3}$ y $P_2(V) = 10^{-5}$.

C.4.2. Experto B

La figura C.5 muestra el árbol de sucesos del experto B. La única diferencia con respecto al de la figura C.1 es la rama de detonación añadida al suceso Y. Esta nueva rama no representa detonaciones directas, sino deflagraciones que terminan en detonaciones a través de procesos DDT. De hecho el experto B, al igual que el experto A, no creía posible las detonaciones directas por la ausencia de fuentes de ignición suficientemente energéticas.

Para cuantificar las probabilidades de las cuestiones propuestas se utilizan las siguientes expresiones:

$$P(Q_1) = P(X) \cdot [P_1(Det) + P_1(Def)] \cdot P(Z_1) + P(X^c) \cdot [P_2(Det) + P_2(Def)] \cdot P(Z_1), \quad (4)$$

$$P(Q_2) = P(X) \cdot [P_1(Det) + P_1(Def)] \cdot P(Z_2) + P(X^c) \cdot [P_2(Det) + P_2(Def)] \cdot P(Z_2), \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 P(Q_3) &= P(Q_{31} \cup Q_{32}) = P(Q_{31}) + P(Q_{32}) - P(Q_{31} \cap Q_{32}) \approx \\
 &\approx P(X) \cdot P_1(Det) \cdot P(Z_1) + P(X^c) \cdot P_2(Det) \cdot P(Z_1) + \\
 &+ P(X) \cdot P_1(Det) \cdot P(Z_2) + P(X^c) \cdot P_2(Det) \cdot P(Z_2)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Suceso Inicial	X	Y	Z _i	Resultado	
Suceso Inicial	Si, P(X)	Detonable, P ₁ (Det)	Si, P(Z ₁)	Detonación	
			No, P(Z ₁) = 1 - P(Z ₁)	Sin combustión	
		Deflagrable, P ₁ (Def)	Si, P(Z ₁)	Deflagración	
			No, P(Z ₁) = 1 - P(Z ₁)	Sin combustión	
		Inerte, P ₁ (Iner) = 1 - P ₁ (Det) - P ₁ (Def)			Sin combustión
		No, P(X) = 1 - P(X)	Detonable, P ₂ (Det)	Si, P(Z ₂)	Detonación
	No, P(Z ₂) = 1 - P(Z ₂)			Sin combustión	
	Deflagrable, P ₂ (Def)		Si, P(Z ₂)	Deflagración	
			No, P(Z ₂) = 1 - P(Z ₂)	Sin combustión	
	Inerte, P ₂ (Iner) = 1 - P ₂ (Det) - P ₂ (Def)			Sin combustión	

Figura C.5. Árbol de sucesos del experto B.

El experto B expresó la idea de que la atmósfera del IRWST puede mantener un equilibrio inestable que en un determinado momento se puede romper y dar lugar a lazos de convección con efectos de venteo. La incertidumbre en la probabilidad de acaecimiento de este suceso, $P(X)$, se expresó a través de una distribución beta de parámetros $\alpha = 17.00$ y $\beta = 32.00$ (figura C.6).

Respecto a las fuentes de ignición dentro del IRWST, el experto declaró la posibilidad de la existencia de descargas aleatorias de electricidad estática y evaluó una distribución beta con parámetros $\alpha = 2.00$ y $\beta = 10.00$ para $P(Z_1)$ (figura C.7), aunque en este punto en particular el experto manifestó una gran incertidumbre.

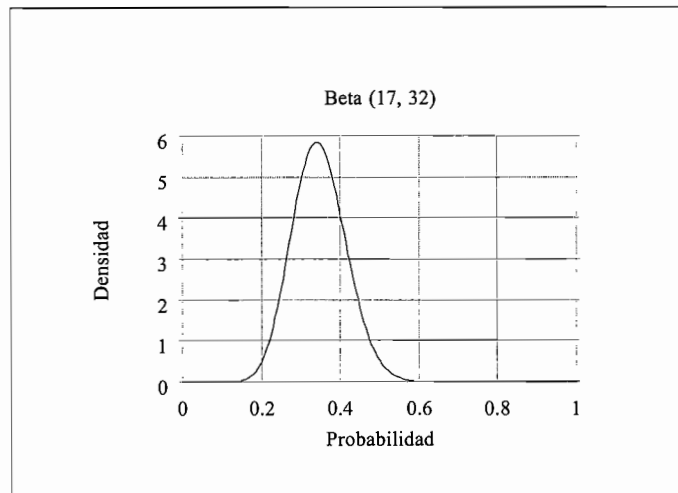


Figura C.6. Función de densidad de probabilidad del experto B para $P(X)$.

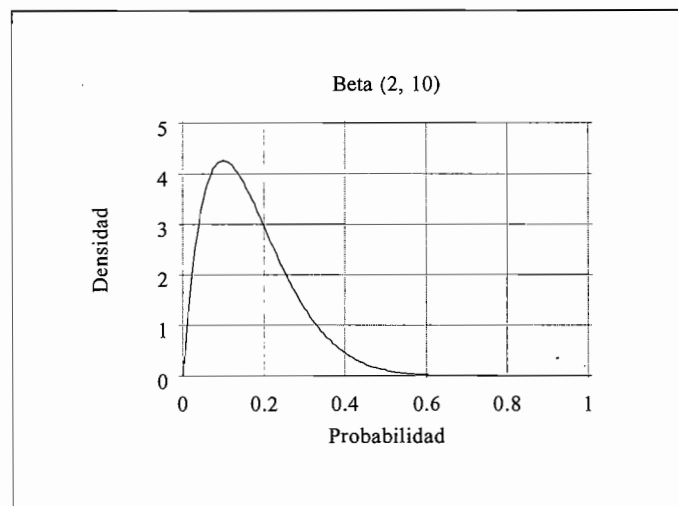


Figura C.7. Función de densidad de probabilidad del experto B para $P(Z_1)$.

Con respecto a $P(Z_2)$, el experto apuntó a la inertización general de los habitáculos inferiores de la contención, pero también creía, de acuerdo a sus resultados con CFX, que en las mismas se podrían producir mezclas inflamables de carácter local cerca de las aberturas y por lo tanto cerca de los ignitores. Esta situación podría dar lugar a una baja tasa de igniciones intencionadas que podrían pasar al IRWST, fenómeno que se cuantificó con una distribución beta de parámetros $\alpha = 8.00$ y $\beta = 40.00$ (figura C.8).

Para evaluar las probabilidades para los diferentes tipos de mezcla el experto analizó las incertidumbres en los resultados del código CFX. Debido a la ausencia de un modelo de condensación

en este código, y también al origen de las condiciones de contorno utilizadas, el experto consideró que las mezclas reales podrían ser hasta un 50% menos ricas en vapor que las mostradas por el código, mientras que la cantidad de hidrógeno en las mismas mezclas reales podría ser hasta un 12% mayor o menor con respecto a lo obtenido con el código. Estos rangos de incertidumbre, pasados al diagrama de Shapiro-Moffette, conforman un área de mezclas posibles que pueden alcanzar condiciones de inflamabilidad e incluso de detonabilidad. Teniendo en cuenta estas áreas el experto proporcionó las siguientes probabilidades: $P_1(Det) = 0.15$, $P_1(Def) = 0.37$, $P_2(Det) = 0.00$ y $P_2(Def) = 7.50 \cdot 10^{-3}$.

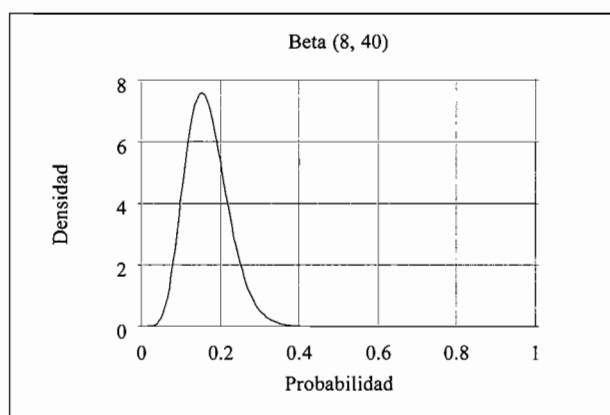


Figura C.8. Función de densidad de probabilidad del experto B para $P(Z_2)$.

En la siguiente tabla C.1 se recogen a modo de resumen las evaluaciones de los expertos para las probabilidades contempladas en los árboles de sucesos.

Tabla C.1. Evaluación de los expertos para las probabilidades de los árboles de sucesos.

	Experto A	Experto B
$P(X)$	Beta ($\alpha=10.00$ $\beta=2.00$), $\mu=0.83$	Beta ($\alpha=17.00$, $\beta=32.00$), $\mu=0.35$
$P_1(Det)$	-	0.15
$P_1(Def)$	0.95	0.37
$P_2(Det)$	-	0.00
$P_2(Def)$	10^{-3}	$7.50 \cdot 10^{-3}$
$P(Z_1)$	Log-normal ($\mu=3.50 \cdot 10^{-4}$, $\sigma=3.30 \cdot 10^{-4}$)	Beta ($\alpha=2.00$, $\beta=10.00$), $\mu=0.17$
$P(Z_2)$	Beta ($\alpha=3.00$, $\beta=1.20$), $\mu=0.71$	Beta ($\alpha=8.00$, $\beta=40.00$), $\mu=0.17$
$P_1(V)$	$5.00 \cdot 10^{-5}$	-
$P_2(V)$	10^{-5}	-

C.5. Agregación de las opiniones individuales

La etapa final de la metodología de juicio de expertos está dedicada a analizar y agregar las evaluaciones de los expertos. Se puede observar que las distribuciones y probabilidades de la tabla C.1. son altamente discrepantes en lo que respecta a la existencia de fuentes de ignición en el IRWST, $P(Z_1)$, y a la existencia de procesos DDT, $P_1(Def) \cdot P_1(V)$ vs. $P_1(Det)$ y $P_2(Def) \cdot P_2(V)$ vs. $P_2(Det)$, además de la discrepancia en aproximadamente un factor cuatro entre sendas probabilidades de paso de llamas desde la sala de bombas hasta el IRWST a través de las aberturas, $P(Z_2)$.

Cuando fueron consultados, los expertos atribuyeron las discrepancias en la existencia de procesos DDT (tres órdenes de magnitud cuando existen efectos de venteo) a las diferentes características de los códigos utilizados, que dan lugar a resultados diferentes en lo que respecta al tipo de mezclas existentes en el sistema. Los expertos también creían que tanto los diferentes esquemas de nodalización utilizados como los procedimientos para cuantificar la probabilidad estarían afectando a las evaluaciones realizadas. Los expertos expresaron gran confianza en estas evaluaciones, de modo que el equipo de proyecto aceptó finalmente las discrepancias acerca de la existencia de procesos DDT.

Con respecto a $P(Z_1)$, existe una discrepancia en media de tres órdenes de magnitud, $\mu = 3.50 \cdot 10^{-4}$ para el experto A y $\mu = 0.17$ para el experto B. Para esta discrepancia los expertos no adujeron ninguna razón consistente, por lo que el equipo de proyecto propuso una sesión de reconciliación en la que se podría discutir el tema en profundidad. En esta sesión se utilizó documentación relativa a la cantidad de energía necesaria para quemar una mezcla inflamable y a la energía liberada por diversas fuentes de ignición. Después de este estudio conjunto los expertos adquirieron mayor confianza en el tema y consideraron que sus evaluaciones iniciales no expresaban adecuadamente sus verdaderas opiniones. El experto A incrementó un orden de magnitud su distribución preliminar para $P(Z_1)$ (figura C.9), mientras que el experto B evaluó una nueva distribución log-normal de parámetros $\mu = 3.00 \cdot 10^{-3}$ y $\sigma = 2.50 \cdot 10^{-2}$ (figura C.10). Las figuras C.9 y C.10 muestran que la sesión de reconciliación indujo a los expertos a alcanzar un consenso.

Por otra parte el experto A expresó su deseo de modificar sus evaluaciones previas para $P_1(Def)$, $P_2(Def)$ y $P_2(V)$ puesto que había reconsiderado algunas de sus incertidumbres. La estimación puntual inicial $P_1(Def) = 0.95$ se cambió por una distribución beta con parámetros $\alpha = 26.00$ y $\beta = 4.00$ ($\mu = 0.87$, figura C.11.) ya que el experto creía que la secuencia propuesta de 1.000 s no era suficiente como para mezclar de forma completa la atmósfera del IRWST. Las probabilidades iniciales $P_2(Def) = 10^{-3}$ y $P_1(V) = 5.00 \cdot 10^{-5}$ también fueron cambiadas a los nuevos valores 10^{-2} y $2.50 \cdot 10^{-4}$ respectivamente, puesto que el experto expresó un menor margen de credibilidad en los resultados del código MELCOR tras comparar diversos cálculos realizados simultáneamente con los códigos MELCOR y RALOC.

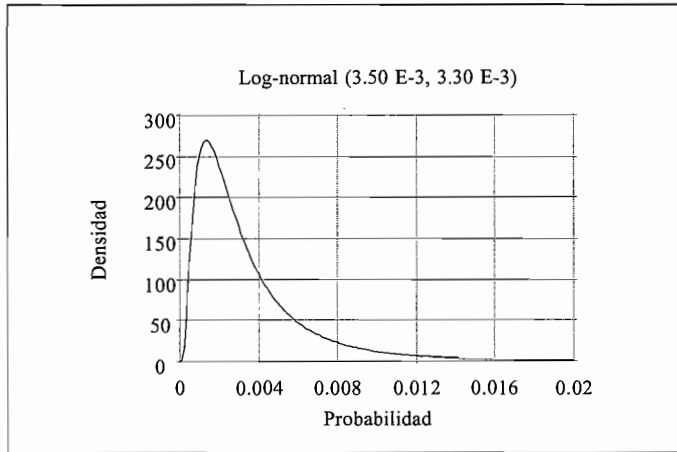


Figura C.9. Función de densidad de probabilidad final del experto A para $P(Z_1)$.

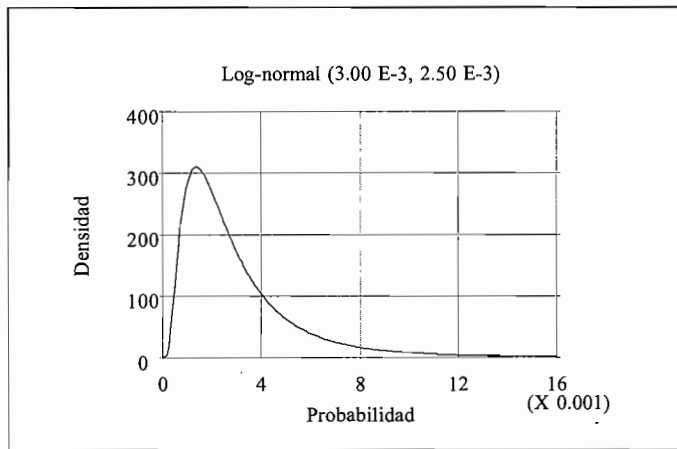


Figura C.10. Función de densidad de probabilidad final del experto B para $P(Z_1)$.

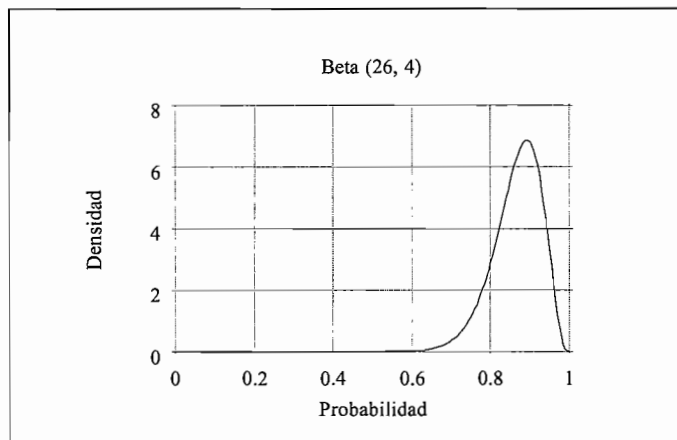


Figura C.11. Función de densidad de probabilidad del experto A para $P_1(Def)$.

Cuando todas las probabilidades estuvieron evaluadas de forma definitiva el equipo de proyecto procedió a muestrear las distribuciones que aparecen en los árboles de sucesos para obtener distribuciones de probabilidad para las tres cuestiones propuestas mediante el uso de las expresiones (1) a (6). Se utilizó un muestreo aleatorio simple y el tamaño muestral fue 1.000. Las siguientes figuras C.12, C.13, C.14, C.15, C.16 y C.17 muestran para cada caso los histogramas obtenidos y la distribución que mejor se ajusta al utilizar el criterio χ^2 .

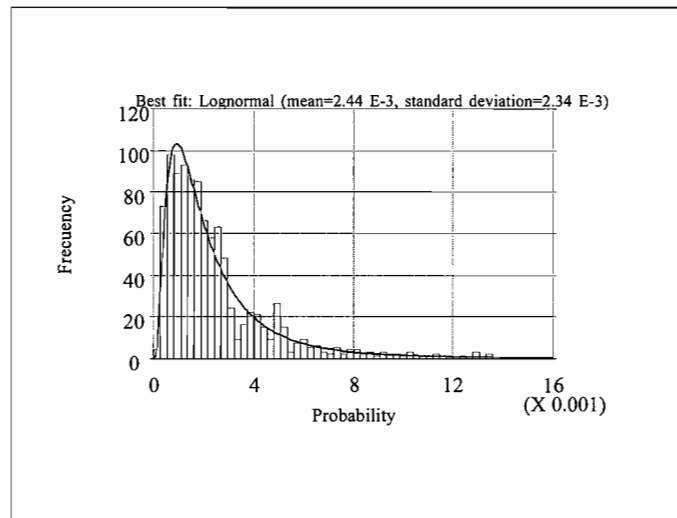


Figura C.12. Función de densidad de probabilidad del experto A para la cuestión 1.

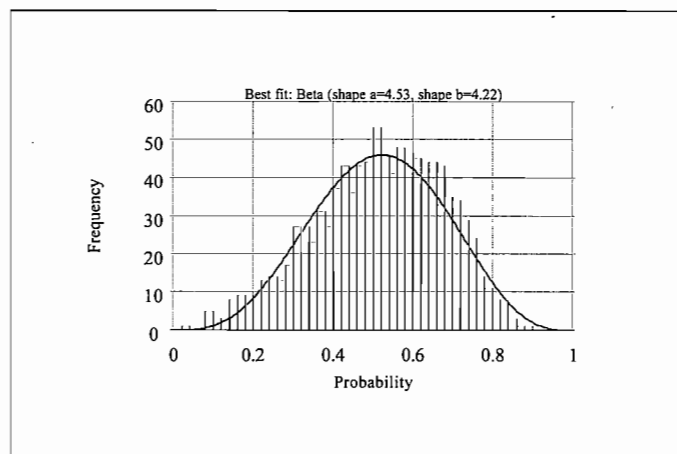


Figura C.13. Función de densidad de probabilidad del experto A para la cuestión 2.

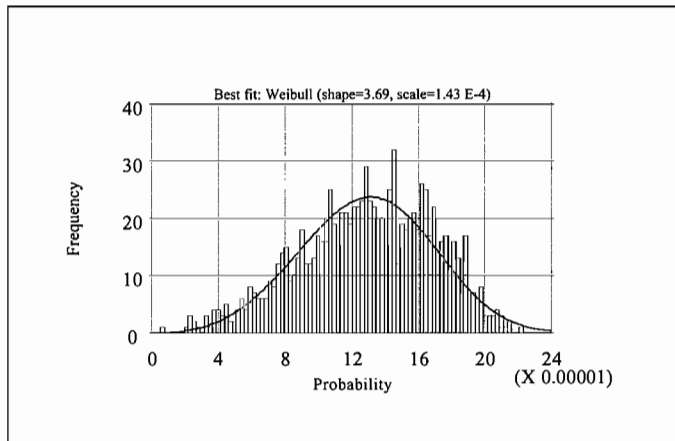


Figura C.14. Función de densidad de probabilidad del experto A para la cuestión 3.

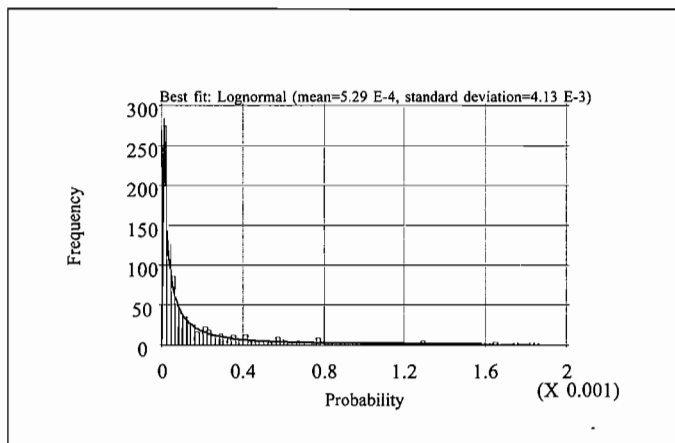


Figura C.15. Función de densidad de probabilidad del experto B para la cuestión 1.

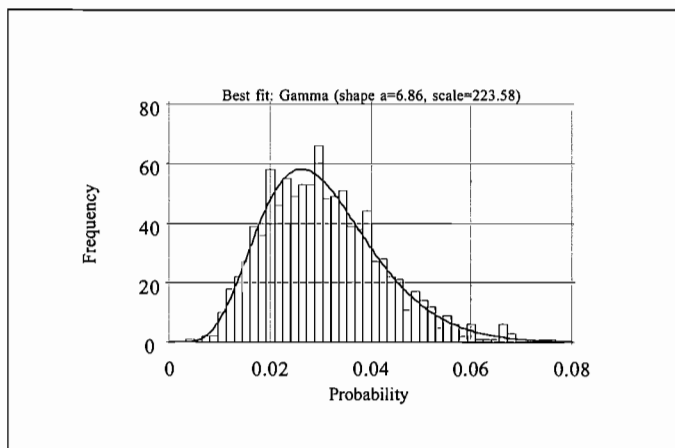


Figura C.16. Función de densidad de probabilidad del experto B para la cuestión 2.

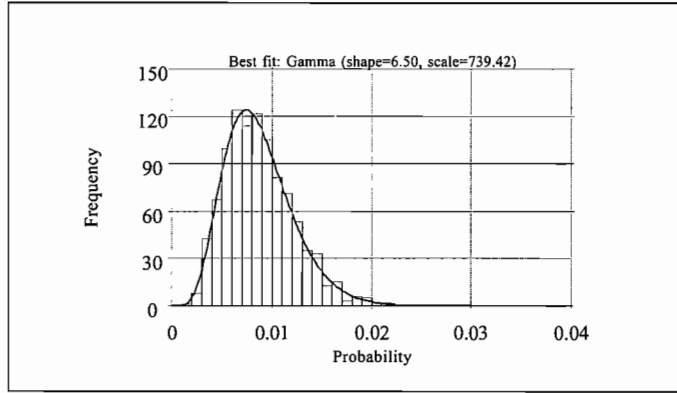


Figura C.17. Función de densidad de probabilidad del experto B para la cuestión 3.

Con el fin de agregar estas distribuciones individuales el equipo de proyecto estudió la magnitud de las discrepancias entre las mismas. La tabla C.2 muestra las medias y los principales percentiles de las distribuciones obtenidas por muestreo. Por su parte las figuras C.18, C.19 y C.20. muestran las comparaciones entre las funciones de probabilidad acumulada para cada cuestión.

Tabla C.2. Media y percentiles de las distribuciones individuales para las cuestiones 1, 2 y 3.

	Media		5%		50%		95%	
	Experto A	Experto B	Experto A	Experto B	Experto A	Experto B	Experto A	Experto B
Question 1	$2.44 \cdot 10^{-3}$	$5.29 \cdot 10^{-4}$	$4.67 \cdot 10^{-4}$	$2.38 \cdot 10^{-6}$	$1.76 \cdot 10^{-3}$	$6.72 \cdot 10^{-5}$	$6.65 \cdot 10^{-3}$	$1.90 \cdot 10^{-3}$
Question 2	0.52	$3.07 \cdot 10^{-2}$	0.25	$1.43 \cdot 10^{-2}$	0.52	$2.92 \cdot 10^{-2}$	0.78	$5.21 \cdot 10^{-2}$
Question 3	$\approx 1.29 \cdot 10^{-4}$	$8.79 \cdot 10^{-3}$	$6.39 \cdot 10^{-5}$	$3.98 \cdot 10^{-3}$	$1.29 \cdot 10^{-4}$	$8.34 \cdot 10^{-3}$	$1.93 \cdot 10^{-4}$	$1.51 \cdot 10^{-2}$

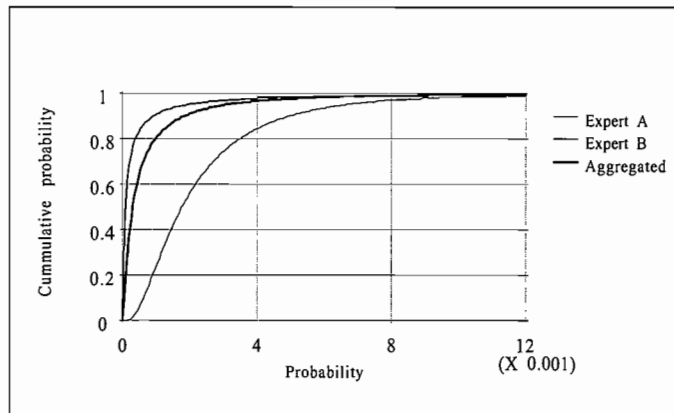


Figura C.18. Comparación entre las funciones de probabilidad acumulada para la cuestión 1.

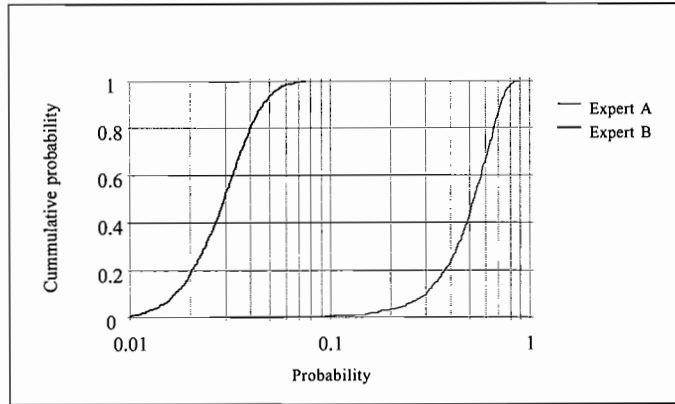


Figura C.19. Comparación entre las funciones de probabilidad acumulada para la cuestión 2.

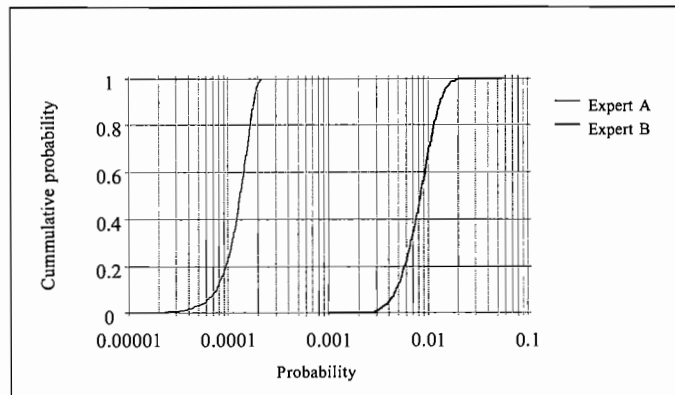


Figura C.20. Comparación entre las funciones de probabilidad acumulada para la cuestión 3.

A partir de las figuras C.19 y C.20 se puede ver que existen grandes discrepancias entre los expertos para las cuestiones 2 y 3, mientras que para la cuestión 1 las distribuciones son congruentes entre sí puesto que existe un solapamiento apreciable entre las mismas. En este último caso se puede utilizar la agregación analítica sin dificultad puesto que la pérdida de información no es muy significativa. Obsérvese que el consenso en la cuestión 1 es debido fundamentalmente al consenso existente entre los expertos en la evaluación de la probabilidad $P(Z_1)$ correspondiente a la existencia de fuentes de ignición en el IRWST.

En el caso de la cuestión 2 se da una discrepancia media de aproximadamente un orden de magnitud. Esta discrepancia se puede atribuir con gran seguridad a la discrepancia en un factor cuatro en las probabilidades de paso de llamas desde la sala de bombas hasta el IRWST a través de las aberturas, $P(Z_2)$, a la discrepancia en un factor superior a dos en la probabilidad de que se establezcan procesos de venteo y a la discrepancia, en un factor ligeramente inferior a dos, en las probabilidades de que se den mezclas deflagrables en el IRWST cuando hay procesos de venteo, siendo en

todos estos casos superiores las probabilidades estimadas por el experto A. En el caso de la cuestión 3 la discrepancia media es de casi dos órdenes de magnitud. Ambos expertos ofrecen cierto grado de acuerdo en los casos en que no hay venteo, considerando el experto A muy improbable la producción de detonaciones, mientras que el experto B las considera directamente imposibles. Sin embargo hay gran desacuerdo cuando se produce venteo. Esta diferencia se debe esencialmente a la discrepancia en tres órdenes de magnitud entre las probabilidades de que se den mezclas detonables o que puedan dar lugar a procesos DDT en el IRWST en esas condiciones, $P_I(V) \cdot P_I(Def)$ (experto A) y $P_I(Def)$ (experto B); pero esto se ve contrarrestado por las discrepancias en las probabilidades de que se produzca proceso de venteo y de que se propaguen llamas a través de las aberturas.

La agregación analítica para la cuestión 1 se realizó utilizando el método bayesiana para dos expertos con distribuciones de tipo log-normal y un decisor con una distribución uniforme como distribución *a priori* ^[10]. El método de las combinaciones lineales requiere definir pesos para cada uno de los expertos, que se pueden obtener por ejemplo a través de ejercicios de calibración, pero el equipo de proyecto opinaba que el mismo se debería utilizar en el caso de que hubiese claras evidencias de sesgos en alguno de los expertos, lo cual no ocurre aquí. Con el fin de evitar la dominación de la distribución más precisa, que es aquella que tiene menor desviación típica, y por lo tanto para preservar tanta información como sea posible, en el esquema bayesiano se utilizó una precisión común para ambos expertos. Esta precisión común, $\sigma = 4.13 \cdot 10^{-3}$, corresponde al experto B, que es el menos preciso. Además se consideró el caso de expertos no correlacionados ($\rho = 0$). Con estas condiciones la distribución *a posteriori* es una log-normal de parámetros $\mu = 8.11 \cdot 10^{-4}$ y $\sigma = 2.12 \cdot 10^{-3}$ (figura C.18). La tabla C.3 muestra la media y los principales percentiles de esta distribución agregada. A partir de estos datos se puede comprobar que las medias, medianas y modas de las distribuciones originales están contenidas en el intervalo del 90% de la distribución agregada.

Tabla C.3. Media y percentiles de la distribución agregada para la cuestión 1.

	Media	5%	50%	95%
Cuestión 1	$8.11 \cdot 10^{-4}$	$2.74 \cdot 10^{-5}$	$2.90 \cdot 10^{-4}$	$3.07 \cdot 10^{-3}$

Con respecto a las cuestiones 2 y 3, la falta de solapamiento en estos casos impide la agregación analítica, ya que cualquier procedimiento que se utilizase, por ejemplo el del informe NUREG-1150 o la agregación bayesiana, produciría resultados que no mostrarían el verdadero carácter discrepante de las estimaciones individuales. Téngase en cuenta que un desacuerdo tan grande como el mostrado en las cuestiones 2 y 3 significa que el experto A no cree verosímil las distribuciones del experto B y viceversa. En estos casos es mejor recurrir a técnicas de grupo con el fin de alcanzar una distribución consensuada entre los expertos. Sin embargo esta opción se eliminó debido a las limitaciones de tiempo de los expertos. Por lo tanto el equipo de proyecto decidió no agregar las distri-

buciones individuales para las cuestiones 2 y 3. Por último cabe recordar que en este ejercicio sólo se han utilizado dos expertos, con lo que resulta más difícil discernir entre las evaluaciones discrepantes. En el caso de más expertos (el número ideal está entre tres y cinco) la aplicación de técnicas de agregación analítica puede resultar más sencilla puesto que se pueden definir de forma mucho más clara las tendencias dominantes y las discrepantes.

C.6. Resumen

Para evaluar la combustión del hidrógeno los expertos han hecho uso de dos códigos de cálculo, MELCOR y CFX. A través de los resultados de los mismos los expertos han mostrado que las condiciones de inflamabilidad se pueden alcanzar solamente cuando existen procesos de venteo de la atmósfera del IRWST. En otro caso esta atmósfera permanece inertizada y la combustión del hidrógeno es un suceso muy improbable para la secuencia accidental propuesta. La presencia de procesos de venteo se puede considerar como un suceso probable debido fundamentalmente a la existencia de igniciones intencionadas en las salas inferiores de la contención que pueden empujar el aire hacia el IRWST a través de las aberturas. La presencia de lazos de convección entre el IRWST y los habitáculos inferiores de la contención también se tiene que tener en cuenta como mecanismo que puede provocar el venteo del IRWST.

A la hora de cuantificar estas evaluaciones cualitativas los expertos han mostrado discrepancias que se pueden imputar tanto a las diferentes características de los códigos utilizados como a las diferentes interpretaciones de sus resultados (eventuales problemas de calibrado). Los expertos están de acuerdo en que la presencia de fuentes de ignición en el IRWST es un suceso improbable, mientras que el paso al IRWST de llamas intencionadas desde los habitáculos inferiores de la contención es un tema no resuelto en el que se han manifestado grandes discrepancias. Otra discrepancia importante tiene que ver con la presencia de procesos DDT en la atmósfera del IRWST. Sin embargo respecto a los diferentes tipos de mezcla que se podrían dar las discrepancias han sido de menor importancia. Todas estas discrepancias en conjunto dan lugar a distribuciones de probabilidad muy diferentes para las cuestiones 2 y 3, lo cual ha impedido la agregación de las mismas. En lo que respecta a la cuestión 1, las distribuciones individuales fueron consistentes y se procedió a agregarlas analíticamente.

C.7. Conclusiones

Las conclusiones más importantes sobre la aplicación de técnicas de juicio de expertos a temas de seguridad nuclear que se pueden obtener a partir del trabajo realizado en la aplicación piloto comentada en este documento son las siguientes:

- El protocolo seguido en el estudio refleja el estado del arte sobre protocolos de juicio de expertos. Cada etapa del protocolo es importante y ninguna de ellas se puede omitir, aunque existe cierta flexibilidad en el tiempo requerido por cada etapa en función de los casos particulares. En este sentido es improbable que en el futuro el proceso global se pudiese mejorar añadiendo nuevas etapas.
- Las sesiones de elicitación realizadas en este ejercicio han puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar herramientas *software* específicas para facilitar a los expertos formular sus opiniones en términos de probabilidades. Esto permitirá agilizar dichas sesiones y generará realimentaciones al experto que ayudarán a mejorar la calidad de sus juicios.
- Las etapas que requieren más tiempo para su realización son aquellas en las que están involucrados los expertos. Con el fin de reducir las necesidades de tiempo de una aplicación de juicio de expertos se podría plantear un período máximo de dos meses para las anteriores actividades. Para alcanzar este objetivo es muy importante realizar una planificación rigurosa de toda la secuencia de etapas del proceso. Así, el tiempo necesario total para completar una aplicación de juicio de expertos podría estar entre cuatro y cinco meses dependiendo de factores tales como las características del problema a evaluar o el número de expertos o su procedencia.
- Para obtener evaluaciones de calidad es imprescindible disponer de participantes cualificados, lo cual se refiere tanto al equipo de proyecto como a los expertos. La disponibilidad de expertos es un tema muy importante, puesto que es muy improbable que los países pequeños puedan disponer de suficientes expertos cualificados para abordar con el suficiente nivel de detalle problemas complejos. Para evitar este problema las entidades supranacionales interesadas, por ejemplo la Unión Europea, podrían establecer protocolos para facilitar la participación de expertos de diferentes países en aplicaciones individuales. Con respecto al equipo de proyecto, la experiencia de los analistas y el conocimiento de los generalistas son aspectos fundamentales para el éxito de una aplicación de juicio de expertos. Además, puesto que no es posible separar completamente las actividades del analista y del generalista, en el ámbito nuclear parece conveniente disponer de analistas específicos con buenos conocimientos sobre temas de seguridad nuclear.
- La agregación de las opiniones de los expertos es un aspecto sobre el que no existen conclusiones definitivas, ni es probable que en el futuro próximo las haya. Las técnicas de agregación disponibles, tanto analíticas como de grupo, se pueden utilizar para tratar un amplio espectro de casos particulares. Las estrategias mixtas en las que se pueden utilizar ambos tipos de técnicas en función de las necesidades son las más adecuadas para obtener opiniones agregadas de la mejor calidad.

Referencias bibliográficas

- [1] COJAZZI, G., *et al.*, *Benchmark Exercise on Expert Judgement Techniques in PSA Level 2*, Symposium on EU Research on Severe Accidents, 17-19 November 1997, Proceedings pp. 468-477 (EC Report EUR 18258 EN).
- [2] EYINK, J., *BE-EJTs Phase 2 Issue Definition*, JRC Report AMM-BE-EJTs(97)-P10 (1997).
- [3] CAMP, A. L., *et al.*, *Light Water Reactor Hydrogen Manual*, NRC Report NUREG/CR-2726 (1983).
- [4] *Hydrogen in Water-Cooled Nuclear Power Reactors*, EC Report EUR 14037 EN (1992).
- [5] BREITUNG, W., *The Behaviour of Hydrogen in Containment*, Eurocourse-97 on Analysis of Severe Accidents in Light Water Reactors, Madrid, 13-17 October 1997, Proceedings, lecture 11.
- [6] MARTINEZ, J. A., *Introduction to Severe Accident Simulation*, Eurocourse-97 on Analysis of Severe Accidents in Light Water Reactors, Madrid, 13-17 October 1997, Proceedings, lecture 15.
- [7] HARPER, F. T., *et al.*, *Evaluation of Severe Accident Risks: Quantification of Major Input Parameters. Expert's Determination of Containment Loads and Molten Core Containment Interaction Issues*, NRC Report NUREG/CR-4551, Vol. 2, Rev. 1, Part 2 (1991).
- [8] MARTÍN-VALDEPEÑAS, J. M., *Application of the CFX 4.1C Code to a H₂ Problem in an Evolutionary Reactor Concept*, CTN-UPM, Informe CTN-01/98 (1998).
- [9] JIMÉNEZ, M. A., *Application of the MELCOR 1.83 Code to a H₂ Problem in an Evolutionary Reactor Concept*, CTN-UPM, Informe CTN-02/98 (1998).
- [10] BOLADO, R., *et al.*, *An Exercise on Bayesian Combination of Expert Judgement for Climatic Predictions at the Yucca Mountain Site*, Proceedings of the ESREL'96/PSAM-III Conferences. Vol 1, pages 505-510. Springer (1996).

D. Planteamiento y análisis del problema de deflagración y detonación en el IRWST. Experto A: Miguel Angel Jiménez García

Introducción

Se resume aquí la contribución del experto A (Miguel Angel Jiménez García) al proyecto “Benchmark Exercise on Expert Judgement Techniques in PSA Level 2” del IV Programa Marco de Investigación en Seguridad Nuclear de Fisión ⁽¹⁾.

Durante el transcurso de una secuencia accidental determinada en el interior de la contención de un reactor evolutivo de diseño europeo, el objetivo del ejercicio consistió en evaluar las distribuciones de probabilidad de los siguientes eventos:

- Aparición de al menos una combustión de hidrógeno dentro del IRWST.
- Propagación al IRWST de una combustión iniciada en otro compartimento.
- Aparición de alguna detonación en el IRWST.

Todo ello durante los 1000 primeros segundos del escape de una mezcla de hidrógeno y vapor a la contención.

A tal efecto, los *términos fuente* de vapor, hidrógeno y entalpía procedentes del sistema primario fueron debidamente suministrados, así como el inventario de productos de fisión presentes y la descripción de los compartimentos y sistemas más directamente afectados. En concreto, las conexiones del IRWST (situado en la cota más baja) con los recintos inferiores de los lazos de refrigeración y generadores de vapor a través de cuatro orificios fueron objeto de particular interés.

D.1. Aproximación al problema

El proceso fundamental de evaluación seguido con el fin de proporcionar respuestas a las tres cuestiones formuladas en el ejercicio puede esquematizarse teniendo en cuenta que, para que se produzca una combustión en una ubicación cualquiera de la contención, han de satisfacerse las siguientes premisas:

- La mezcla aire/vapor/hidrógeno debe encontrarse en *condiciones inflamables* en el lugar de interés.
- Existencia de *fuentes ignitoras* eficaces:
 - En la propia ubicación.
 - Propagación procedente de otra región de la mezcla de gases.

Estos factores dependen fundamentalmente del proceso de *distribución* de la mezcla gaseosa y de las características de las *fuentes ignitoras* identificadas como iniciadoras de combustión.

La *detonación* es un caso especial dentro del fenómeno de la combustión. Por tanto, una vez establecida la posibilidad de que la combustión ocurra debe evaluarse cuál es la probabilidad de que dicha combustión se desarrolle en el régimen de detonación.

Con estos precedentes, se consideró conveniente estructurar el proceso de evaluación de la siguiente manera:

- *Estudio de distribución.* Establecimiento de las condiciones de inflamabilidad de la mezcla de gases presente en el edificio de contención en las distintas ubicaciones y su evolución en el tiempo.
- *Estudio sobre la combustión:*
 - *Eficacia de las fuentes ignitoras* (ignitores, recombinadores, chispas, puntos calientes, autoignición de la mezcla).
 - Evaluación de la *propagación* desde otras zonas e influencia de la combustión en la distribución.
 - Posibilidad de *detonación* como régimen de combustión.
- Asignación de *probabilidad* de los eventos.

El procedimiento de aproximación a las respuestas a las cuestiones requeridas se abordó haciendo uso de las siguientes herramientas:

- Información proporcionada sobre el edificio de contención, sistemas y fuentes de energía y materia.
- Bibliografía sobre fenomenología y experimentos.
- El código integral de parámetros promediados MELCOR, desarrollado por Sandia National Laboratories para la US-NRC, en su versión 1.8.3. ^[2].
- El código de mecánica de fluidos numérica CFDS-CFX 4.1, desarrollado por AEA Technology (UK).

El código MELCOR fue la herramienta analítica principal, si bien se estimó muy conveniente el apoyo procedente de la visión del problema proporcionada por CFX en algunos aspectos del problema.

Inicialmente se realizaron una serie de cálculos tentativos con el propósito de comprobar que los términos fuente introducidos en la contención coincidían con los del problema, así como estu-

diar los patrones de flujo dominantes y los principales procesos implicados. Se reprodujo por completo el edificio de contención, pues por un lado la capacidad del código lo permite dentro de su aproximación, y por otro existen procesos de *convección natural* a gran escala que en el intervalo de tiempo del problema (1000 s) pueden afectar significativamente la composición local de la mezcla gaseosa.

Es precisamente la *composición* de la atmósfera en contención y su evolución en el tiempo en los distintos recintos el parámetro fundamental que permitió realizar una aproximación a la probabilidad de inflamación y de propagación y, por tanto, su cuantificación.

Para ello se utilizó como base el conocido diagrama trifásico de *Shapiro y Moffette* (S-M) ^[3] (figura D.1) derivado del modelo ZND sobre inflamabilidad de mezclas aire/hidrógeno/vapor en función de su composición. La hipótesis de *curvas de nivel* sobre dicho diagrama como indicadores de la inflamabilidad de la mezcla y las características de su combustión se valoró como una aproximación adecuada.

El resultado último de este proceso permitió disponer de *probabilidades elementales* de sucesos que, debidamente combinadas, condujeron a valores de probabilidad como respuesta a las tres preguntas propuestas. Finalmente, sus distribuciones se perfilaron a través de las sesiones de elicitación.

Esta contribución al ejercicio ha requerido un total de tres meses-persona, que incluyen: estudios preliminares, establecimiento de la metodología, preparación de las entradas de código, cálculos y análisis de resultados, estimación de probabilidades, sesiones de elicitación y redacción de informes.

D.2. Análisis y cálculos

La utilización de códigos de parámetros promediados (aproximación lumped-parameter), si bien permite hacer un tratamiento *integrado* de cuantos fenómenos intervienen, adolece de ciertas carencias. En particular, su esquema analítico se basa en una hipótesis de *valores promedios* de las magnitudes en volúmenes que, en el caso de una contención a escala real, pueden llegar a ser muy grandes, de hasta miles de metros cúbicos. Bajo esta visión del problema, la existencia de intensos *gradientes* en los campos de las variables (velocidad, temperatura o composición química) y su influencia en los procesos de *transporte* (sobre todo en procesos turbulentos) es pasada por alto ^[4]. Ello conduce en ocasiones a interpretaciones en las que se sobrestima la *homogeneización*, lo cual ha sido evidenciado en algunos de los experimentos que, con tal propósito, se han propuesto ^[5].

Se precisó, pues, realizar una nodalización más detallada del edificio en aquellas zonas que se identificaron como susceptibles de presentar mayores gradientes, para paliar la homogeneización introducida artificialmente por el código. La ayuda de una herramienta numérica detallada (CFX 4.1) confirmó las sospechas que recaían sobre los orificios de venteo en el techo del IRWST hacia las zonas superiores ⁽⁶⁾ y permitió matizar los resultados obtenidos a través de MELCOR. En otras ocasiones fue necesario prescindir de este detalle por problemas de oscilación numérica en los resultados del código MELCOR al tratarse de volúmenes muy pequeños.

D.2.1. Cálculos de distribución

Hechas las consideraciones anteriores, se procedió a determinar, dentro de las incertidumbres asociadas a los fenómenos, los modelos y las herramientas, la evolución temporal de la composición de la mezcla aire/hidrógeno/vapor en el edificio de contención.

La presencia de *productos de fisión* suspendidos o disueltos en la atmósfera de contención podría influir en los procesos termohidráulicos responsables del transporte de masas, principalmente a través del calentamiento de la mezcla de gases por absorción de la energía de su desintegración. No obstante, se evaluó la tasa de calentamiento asociada en valores del orden de los 0.01 K/s (unos 10 K en total tras todo el intervalo del ejercicio), muy por debajo del ritmo de incremento de entalpía debido al material procedente del primario.

Otro aspecto del problema a ser evaluado fue el cómo podría afectar a la mezcla hidrógeno/vapor emergente desde el primario su paso a través de la piscina del IRWST de 4 metros de profundidad, paso forzado desde unos burbujeadores (spargers). Su propósito, además de la retención de productos de fisión por disolución o deposición, es también la condensación y el enfriamiento de parte del gas saliente. Para ello fue activado el modelo SPARC de MELCOR de ascenso de burbujas gaseosas en masas líquidas.

En este primer estudio, se desactivaron las rutinas de combustión del código MELCOR, a fin de que la cantidad de gas combustible y su distribución no se vieran afectados por combustiones en su seno. Estos cálculos posibilitaron la identificación de regiones de gas en condiciones inflamables y su duración temporal característica en las distintas ubicaciones. Resultados de esta búsqueda fueron:

- Los compartimentos bajos de los lazos de refrigeración, directamente conectados con el IRWST por los orificios de venteo alcanzan composiciones *inflamables* rápidamente.
- Por el contrario, el IRWST permanece *inertizado* durante casi todo el intervalo temporal [0, 1000], por la gran cantidad de vapor procedente del circuito primario (pues desde el

inicio de la secuencia la piscina líquida del IRWST se encuentra en ebullición). Este vapor expulsa todo el aire hacia los compartimentos superiores.

- Puede, sin embargo, producirse la *desinertización* del IRWST en los últimos minutos del problema por el establecimiento de un lazo de *convección* estable que permite el intercambio de gas entre éste y la atmósfera de la parte inferior del edificio. La entrada de aire fresco, cuando la intensidad de la fuente de vapor ha decrecido, a través de este mecanismo se reveló como la única causa capaz de permitir igniciones dentro de la atmósfera del IRWST, cualquiera que fuera su origen, en los primeros 1000 s del accidente postulado.

En función de la composición de la mezcla en cada momento, se asignó para cada ubicación un valor indicativo de la posibilidad y la intensidad de la combustión ^[1]. Este valor (parámetro de sensibilidad *SP*) corresponde al asignado en las curvas de nivel del diagrama S-M (ver figura D.1), de modo que las mezclas dentro de la zona de inflamabilidad poseían un valor de *SP* que varía entre 0.6 (valor en el límite inferior de inflamabilidad) y 1.0 (mezclas estequiométricas secas aire/hidrógeno). El límite inferior de mezclas detonables se caracterizó por un valor $SP = 0.95$. El concepto de *SP* no se introdujo sólo para dar idea de la probabilidad de la combustión en presencia de una fuente ignitora eficaz, sino que incluiría, además, la consideración de que la combustión por ella producida afectase a una masa de gas significativa dentro del habitáculo y fuera así capaz de propagarse a las regiones vecinas. De alguna manera la utilización de este parámetro se inspiró en la metodología propuesta por Sherman y Berman ^[7], si bien se intentó establecer no ya cinco categorías de mezclas gaseosas sino más bien una escala gradual de inflamabilidad. Consideraciones geométricas adicionales no se tuvieron en cuenta si no se trataba de determinar la probabilidad de detonaciones.

D.2.2. Cálculos de combustión

El siguiente capítulo hace referencia a la *combustión* del gas en el edificio de contención. De hecho, las preguntas del ejercicio están orientadas hacia este fenómeno. El primer paso de este estudio se encaminó hacia la *identificación* de las posibles fuentes ignitoras y la determinación de su *eficacia*. Posteriormente se pasó a asignar un valor de probabilidad de la fuente ignitora (*ISP*), como la probabilidad de que tal fuente fuese capaz de producir una combustión en una mezcla con $SP = 1$.

Por el aspecto formal de las cuestiones, se consideró adecuado dividir el estudio en dos partes: uno enfocado sobre las posibles fuentes ignitoras en el propio IRWST y otro orientado a la existencia de fuentes de ignición ajenas a él. Del estudio sobre fuentes ignitoras se desprendieron las siguientes valoraciones:

Dentro del propio IRWST:

- La *autoignición* de la mezcla fue descartada, debido a las altas temperaturas (más de 500 °C) requeridas para ello. Los valores de temperatura obtenidos no rebasaron significativamente los 150 °C.
- El calentamiento del gas por los productos de fisión suspendidos se estimó claramente insuficiente y no se consideró significativa la eficacia de *puntos calientes* como iniciadores de combustión en una atmósfera tan rica en vapor como la del IRWST en el transcurso de casi todo el accidente.
- Ante la ausencia de componentes eléctricos en el IRWST, se postuló la eficacia de otras posibles fuentes no identificadas como *muy poco probables*, con valores de ISP asignados: 0.001, 0.0003 y 0.0001.

Las fuentes externas al IRWST fueron las principales candidatas a la ignición en las condiciones postuladas. En particular:

- Los *ignitores* situados sobre los venteos del IRWST en los habitáculos inferiores del lazo se consideraron la mayor contribución como fuentes iniciadoras de combustión.
- La contribución de otros dispositivos (*recombinadores*) se valoró como poco eficaz en comparación con los anteriores al tratarse de atmósferas ricas en vapor (no secas).

Por las características de los modelos específicos del código MELCOR, que se utilizó como herramienta de simulación, la asignación del valor de *ISP* para los ignitores se hizo de una forma algo diferente. Se consideraron tres *valores límite* de la concentración de H_2 por debajo de los cuales se supuso que el ignitor sería incapaz de iniciar una combustión (para cualquier valor del *SP* de la mezcla), y por tanto, *ISP* sería igual a 0.0. Si la $[H_2]$ rebasase en algún momento dicho valor límite, *ISP* tomaría el valor 1.0 en los recintos en que un ignitor activo estuviera presente. Los valores límite de concentración utilizados fueron 0.06 (el 6%), 0.07 (el 7%) y 0.085 (el 8.5%), dentro del rango de capacidades reconocido para este tipo de dispositivos.

D.3. Aproximación a las probabilidades

Partiendo de la información de la que hasta este punto se disponía, se procedió a la *cuantificación* de la *probabilidad* para los sucesos a que se referían las preguntas propuestas en el ejercicio.

Para ello, y debido al carácter de las cuestiones, inquiriendo respecto a la “probabilidad de que ocurra alguna vez un evento dado en el intervalo [0, 1000] segundos”, se resolvió que la forma

más adecuada de abordar el problema era determinarla partiendo de la probabilidad de su suceso *complementario*, esto es, de la “probabilidad de que dicho proceso no ocurriese nunca en los primeros 1000 segundos del accidente”.

De esta manera, se obtuvieron una serie de tablas en las que, para distintos momentos a lo largo del intervalo [0, 1000], se evaluó, para cada instante de muestra t_i , la probabilidad de que la combustión se produjera entre t_i y t_{i+1} a través de su complementaria:

$$P_s(t_i) = 1 - NP_s(t_i)$$

donde

$$NP_s(t_i) = NP_s(t_{i-1}) [1 - SP_s(t_i) \times ISP_s(t_i)]$$

es la probabilidad de que no haya ocurrido combustión alguna hasta el instante t_i en cada ubicación s .

En el caso de combustiones propagadas al IRWST desde los habitáculos inferiores a través de los orificios de venteo, el valor de $NP_s(t_i)$ debería tener en cuenta que dicha propagación podría producirse por cualquiera de los dos venteos presentes en cada una de las dos mitades del IRWST:

$$NP_s(t_i) = NP_s(t_{i-1}) [1 - SP_s(t_i) \times SP_{recinto A}(t_i)] [1 - SP_s(t_i) \times SP_{recinto B}(t_i)]$$

Pues en este caso la fuente ignitora sería una combustión propagada desde cualquiera de los dos recintos superiores (A y B), cuya ISP hacia el IRWST se evaluó como

$$ISP(t_i) = SP_{recinto} \times ISP_{ignitor}$$

Con un valor de $ISP_{ignitor} = 1$ cuando el valor de la $[H_2]$ en el recinto correspondiente estuviese dentro del límite del ignitor y 0 en caso contrario.

D.3.1. Consideraciones sobre el muestreo del intervalo temporal

Los valores de probabilidad obtenidos de esta manera vendrían fuertemente determinados por la *discretización* del intervalo temporal [0, 1000] en distintos instantes t_i . Siempre que los valores de SP e ISP correspondientes sean no nulos, se comprueba que la serie $NP_s(t_i) \rightarrow 0$ cuando $t_i \rightarrow 1000s$, a medida que la discretización temporal es cada vez más fina ($\Delta t \rightarrow 0$). Al contrario, discretizaciones con muy pocos t_i conducen a $NP_s(t = 1000 s)$ con valor unidad y, por tanto, a probabilidades P_s artificialmente bajas de los sucesos.

El *muestreo* adecuado del intervalo $[0, 1000]$ hubo de basarse también sobre consideraciones de carácter físico. Es decir, si el proceso de *cuantificación* de la probabilidad se basó en la toma de distintas instantáneas t_i de la situación del sistema, el intervalo temporal entre éstas debería ser lo bastante dilatado como para que dos instantes t_j y t_{j+1} consecutivos no fuesen una repetición de la misma situación y, a la vez, no estuviesen excesivamente separados de modo que se perdiese información de alguna situación intermedia entre ambas. En otras palabras, fue necesario tener en cuenta los *tiempos característicos* de los fenómenos que en cada caso intervenían. Las variaciones de la concentración ocurren en tiempos del orden de varias *decenas de segundos*, mientras que la combustión transcurre en tiempos de *segundos*. Por tanto, muestreos con Δt mayores que 100 s se consideraron faltos de información. Muestreos con Δt del orden de 1 s o menores conducían a una *convergencia artificial* de los valores de probabilidad como los comentados en el párrafo anterior.

Por tanto, se eligieron los valores de $\Delta t = 20$ s para el caso de *distribución* y de 10, 30 y 60 s para los cálculos de *combustión* como adecuados para hacer la discretización temporal sin excesivas variaciones de los resultados. Incluso en los procesos de combustión, caracterizados por tiempos inferiores al valor de Δt más pequeño (10 s), no se produjo una significativa pérdida de información, como ya se indicará más adelante.

D.4. Respuestas a las cuestiones propuestas

Una vez descrito cómo el proceso de cuantificación de las probabilidades se llevó a cabo, se resumen a continuación los resultados finales del mismo. No obstante, la referencia ^[1] puede contener otras consideraciones adicionales de gran interés.

D.4.1. Probabilidad de que ocurra al menos una combustión en el IRWST

Este suceso podía producirse fundamentalmente a través de dos vías: que la combustión se iniciase en el propio IRWST o bien que se propagase a él desde algún otro lugar del edificio. La segunda opción se consideró que era el objetivo de la cuestión siguiente, con lo que aquí solamente se tuvo en cuenta la posibilidad de que la combustión se iniciase en el mismo IRWST.

La respuesta a esta cuestión se desprende sobre todo de los cálculos efectuados para distribución del gas en ausencia de los ignitores en la contención, pues tal causa estaba fuera del caso. Por dos causas básicas, a saber, *la ausencia de fuentes ignitoras* claramente identificadas, y el hecho de que la atmósfera del IRWST se encontrase en *condiciones inertes* durante casi todo el intervalo $[0, 1000]$, condujeron a la consideración de este evento como *muy poco probable*.

D.4.2. Probabilidad de propagación al IRWST de una combustión originada en los recintos superiores

Esta pregunta fue abordada desde los cálculos con combustión en contención en sus diversas variantes: distintos valores de la $[H_2]$ límite sobre la que se asume que los ignitores producen la combustión con éxito (se propusieron los valores 0.06, 0.07 y 0.085), y variaciones en la *completitud* de la combustión y el parámetro TFRAC de MELCOR que afectan a la intensidad de la combustión y a su *propagación* a otras zonas.

El estudio realizado arrojó los siguientes resultados:

- Las atmósferas de los recintos en que los ignitores se encuentran alcanzan con rapidez las *condiciones inflamables*, en las que permanecen prácticamente hasta el final del problema.
- El IRWST permanece en condiciones *inertes* hasta que se produce una intrusión de aire procedente de los recintos superiores.
- La producción de combustiones en estos habitáculos superiores favorece el desequilibrio entre los dos venteos de cada mitad del IRWST, *provocando*, por tanto, la ventilación del mismo y favoreciendo la aparición de *condiciones inflamables*. Esto ocurría ya entrada la segunda mitad del problema.
- Un factor fundamental en la posibilidad de propagaciones constituía el valor de la $[H_2]$ *límite* a partir del cual se supuso que los ignitores podrían tener éxito en provocar la combustión. Un valor bajo (del 6%) favorecía la eliminación paulatina de hidrógeno en instantes más tempranos, cuando aún no habían aparecido condiciones inflamables en el IRWST, y conducían a un valor final de la probabilidad del evento igual a cero ^[1]. Sin embargo, este valor límite de ignición se consideró muy bajo en términos realistas. Valores mayores (7% y 8.5%) proporcionaron probabilidades *casi seguras* (superiores al 80%) del suceso.
- El muestreo temporal no introdujo cambios significativos en los valores de probabilidad, salvo para el valor $\Delta t = 60$ s. Este valor se consideró en el límite del máximo aceptable dados los tiempos característicos del proceso de combustión y de los patrones de movimiento de gas por él inducidos.

Por todo esto, se consideró a este evento como *muy probable*, pues el éxito de la ignición se consideró como un hecho casi cierto en un intervalo de tiempo tan grande y con condiciones de inflamabilidad suficientemente dentro de los límites (valores de *SP* por encima de 0.7). Los cálculos mostraron series sucesivas de deflagraciones en los recintos superiores susceptibles de propagarse al IRWST en la mayoría de los casos.

D.4.3. Probabilidad de detonación en el IRWST

Para esta cuestión se aplicó fundamentalmente el criterio $D \geq 7\lambda$ de Dorofeev^[8], en el que D es la *dimensión característica* de la nube de gas (en este caso, la dimensión de cada mitad del IRWST, del orden de los 10 m) y λ es el tamaño de *celda de detonación*, que depende fundamentalmente de la composición de la mezcla. Los valores de λ se encontraron siempre por encima de 5 m, por lo que se consideró como *muy poco probable* el desarrollo de detonaciones en el IRWST en el intervalo [0, 1000].

La gran cantidad de vapor presente en el IRWST al principio del accidente fue, sobre todo, la responsable del valor tan grande de λ . Se recalcó que, bien por una condensación del vapor más intensa, bien por la ventilación de la atmósfera del IRWST, la mezcla gaseosa presente en el mismo podría llegar a entrar en condiciones detonables, aunque en tiempos ya posteriores a 1000 s.

D.5. Conclusiones

- El problema propuesto responde a una situación accidental en un entorno (el IRWST) muy rico en vapor y pobre en oxígeno. En estas condiciones, la aparición de combustiones en el corto plazo se estima como muy poco probable.
- Sin embargo, la ventilación de la atmósfera del IRWST en fases tardías del intervalo temporal propuesto se revela como el principal factor responsable de que la mezcla gaseosa en dicha ubicación alcance condiciones inflamables.
- La producción de combustiones inducidas por los ignitores encima de los venteos del IRWST provoca la formación de lazos de convección cuyo efecto es precisamente la entrada en éste del aire al que hacía referencia el punto anterior. En estas condiciones, la propagación de alguna de dichas combustiones hacia el IRWST se considera muy creíble.
- Este riesgo puede verse mitigado, al menos en parte, por dispositivos de ignición capaces de iniciar la combustión en mezclas pobres en hidrógeno y ricas en vapor.
- La detonación se considera muy poco probable en el IRWST durante los primeros 20 minutos del accidente por la elevada presencia de vapor. Sin embargo, la condensación de éste o el venteo del IRWST pueden ser los causantes de que, en instantes posteriores, la atmósfera del mismo llegue a ser detonable.

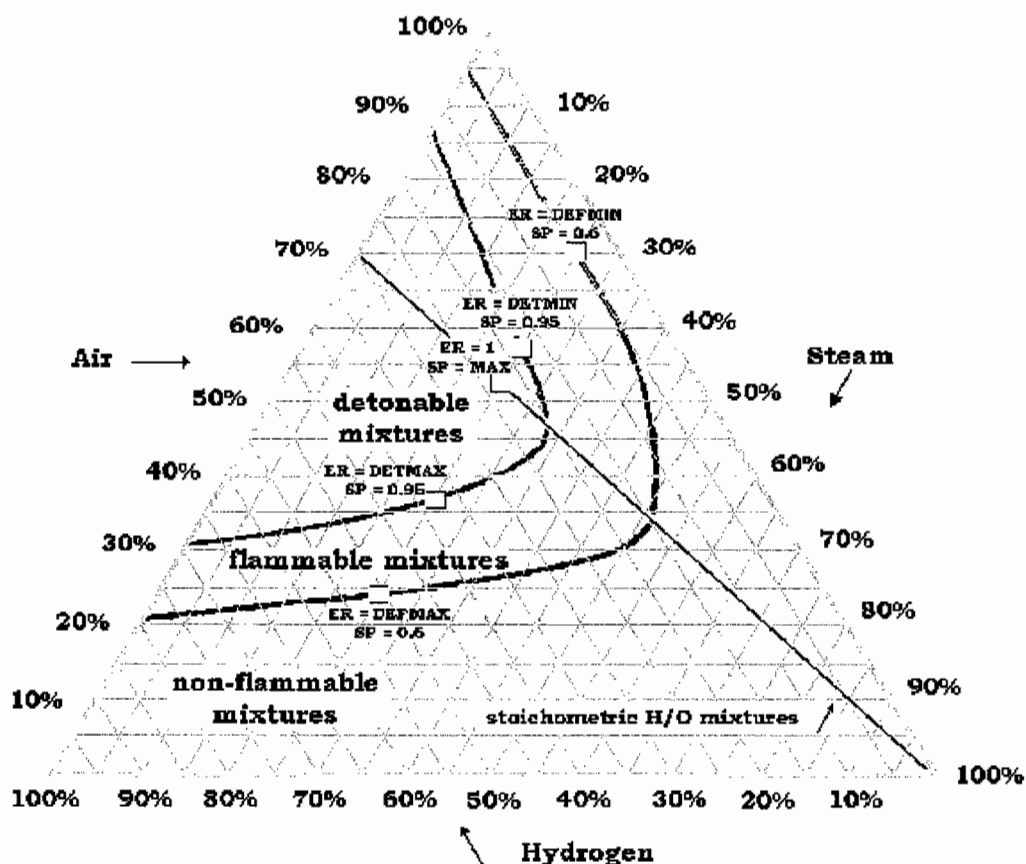


Figura D.1. Diagrama de Shapiro y Moffette (S-M) y curvas de nivel del parámetro SP.

Referencias bibliográficas

- [1] Jiménez García M. A., *Application of the MELCOR 1.8.3 code to a hydrogen problem in an evolutionary reactor concept*, CTN-UPM, CTN-02/98, Enero 1998.
- [2] Summers R. M., Cole Jr. R. K., Smith R. C., Stuart D. S., Thompson S. L., Hodge S. A., Hyman C. R., Sanders R. L., *MELCOR Computer Code Manuals (version 1.8.3 Sept 1994) Vol 1: Primer & User's Guides y Vol 2: Reference Manuals*, SNL, NUREG/CR-6119, SAND93-2185, Marzo 1995.
- [3] Camp A. L., et al., *Light Water Reactor Hydrogen Manual*, SNL, NUREG/CR-2726, SAND82-1137, Agosto 1983.
- [4] Jiménez M. A., Martín-Valdepeñas J. M., Arribas M. J., Martín-Fuertes F., *Revisión de los códigos de parámetros promediados y CFD en cuanto a modelos para distribución y combustión del H₂ en la contención*, CTN-UPM/CSN, CTN 30/96, Octubre 1996.

- [5] Martín-Valdepeñas J. M., Jiménez M. A., Martín-Fuertes E., Coordinador CSN: Robledo E., *Revisión de experimentos de mezcla y distribución de H₂ en contención*, CTN-UPM, CTN-20/96, Septiembre 1996.
- [6] Martín-Valdepeñas J. M., *Application of the CFX-4.1C code to a H₂ problem in an evolutionary reactor concept*, CTN-UPM, CTN-01/98, Enero 1998.
- [7] Sherman M. P., Berman M., *The possibility of local detonations during degraded-core accidents in the Bellefonte Nuclear Power Plant*, SNL, NUREG/CR-4803, SAND86-1180 R3, Enero 1987, Nuclear Technology Vol 81 nº 1, Abril 1988.
- [8] Dorofeev S. B., *Turbulent combustion and DDT events as an upper bound for H₂ mitigation techniques*, RRC KI, publicado en *Proceedings of the OCDE/NEA/CSNI Workshop on the Implementation of Hydrogen Mitigation Techniques* (Winnipeg, Manitoba, Canadá, 13-15 Mayo 1996). AECL-11762, NEA/CSNI/R(96)8, ISBN 0-660-16916-9, Marzo 1997. Sesión V, capítulo 5.1, págs 415-431.

E. Planteamiento y análisis del problema de deflagración y detonación en el IRWST. Experto B: Juan Manuel Martín-Valdepeñas Yagüe

Introducción

El propósito de este apartado es resumir la contribución del experto B (Juan Manuel Martín-Valdepeñas Yagüe) al proyecto "Benchmark Exercise on Expert Judgement Techniques in PSA Level 2" dentro del IV Programa Marco de Investigación en Seguridad Nuclear de Fisión ^[1].

El ejercicio de juicio de expertos ha consistido en la evaluación de la probabilidad de combustión (deflagración, propagación y detonación) en los compartimentos inferiores de un reactor evolutivo de diseño europeo. Se ha supuesto un escenario accidental causado por la pérdida de suministro eléctrico exterior con la indisponibilidad de los generadores diesel de emergencia. Esto provoca una secuencia accidental con liberación de vapor e H_2 a la atmósfera de la contención. En el ejercicio, estos gases se liberan a la contención a través del Tanque de Almacenamiento de Agua (IRWST) que se encuentra en la parte inferior de la contención y que se comunica con la zona inferior de los recintos de los lazos por medio de cuatro conductos.

E.1. Aproximación al problema

Con objeto de cuantificar las variables del ejercicio (esencialmente, distribuciones de probabilidad de combustión) se realizó el estudio en dos fases:

- Distribución de H_2 en la atmósfera.
- Combustión de H_2 .

El estudio de la distribución de H_2 en la atmósfera de la contención permitió identificar las distintas mezclas inflamables presentes y evaluar la probabilidad de que dichas mezclas ocurran. Seguidamente, se asignó una probabilidad de inflamabilidad con objeto de responder a las preguntas planteadas.

Las herramientas básicas con que se ha contado para poder realizar el estudio de distribución han sido las siguientes:

- Experimentos de distribución de H_2 llevados a cabo por diversos organismos e instituciones internacionales ^[2].
- Código integral de parámetros concentrados MELCOR 1.8.3 ^[3].
- Código de fluidodinámica computacional CFX 4.1C ^[4].

La utilización de un código de parámetros concentrados como MELCOR permitió la evaluación del comportamiento global de la atmósfera de la contención. Sin embargo, la hipótesis básica de este tipo de códigos es la de atmósfera homogénea y aproximación a grandes nodos. Esto no concuerda con ciertos fenómenos asociados al comportamiento de H_2 en contención como son las acumulaciones locales y la estratificación de la atmósfera, que han sido evidenciados por los experimentos (series HDR, NUPEC, etc.) [2].

Para el estudio de este tipo de fenómenos se ha elegido el código de fluidodinámica computacional CFX. Dicho código resuelve las ecuaciones diferenciales de la mecánica de fluidos en una malla de cálculo a la escala del fenómeno que se estudia, introduciendo aproximaciones para la turbulencia. Esto permite estudiar en detalle el comportamiento del H_2 en contención, supliendo las carencias de los códigos de parámetros concentrados [5].

Una vez estudiada la distribución de H_2 en la contención, se asignó una probabilidad a la formación de mezclas con posibilidad de ser inflamables. Seguidamente se evaluó la probabilidad de inflamabilidad de dichas mezclas utilizando para ello el diagrama de Shapiro-Moffette [6].

Basándose en los datos obtenidos de estos estudios se definieron las distribuciones de probabilidad de combustión, propagación y detonación correspondientes a las tres preguntas del ejercicio. Dichas distribuciones se definieron durante las sesiones de elicitación, como se comenta en otros apartados de este documento.

Para la realización de este ejercicio han sido necesarios tres meses-persona (estudio de la metodología, preparación de las nodalizaciones, geometrías y mallados, realización de las entradas de los códigos, análisis de los resultados y estimación de las probabilidades). En cuanto al tiempo de CPU invertido solamente en la realización de cálculos, ha sido de aproximadamente cuatro días completos, consumidos principalmente por CFX.

E.2. Cálculos

En la nodalización realizada para el código MELCOR se ha representado la totalidad del edificio de contención del reactor estudiado. Se utilizaron cinco nodos (volúmenes de control), para simular el IRWST (atmósfera y piscina), el compartimento inferior de las bombas del primario (entre las cotas 1.50 m y 5.15 m), los recintos de los generadores de vapor y el volumen libre. Para conectar la atmósfera del IRWST con los compartimentos inferiores de las bombas se utilizaron cuatro caminos de flujo que representaban los conductos que conectan ambos compartimentos.

Los fenómenos y parámetros que se analizaron con el código MELCOR fueron el burbujeo de vapor e hidrógeno a través de la piscina del IRWST, la temperatura de la mezcla de gases que abandona la superficie libre del agua y la condensación del vapor. Las incertidumbres a la hora de evaluar la condensación del vapor fueron bastante importantes debido al propio modelo del código MELCOR y a las dificultades de estimar las masas de acero y de hormigón presentes en la contención. Además, los cálculos permitieron evaluar el comportamiento global de la contención durante la secuencia accidental.

Con el código CFX se estudió el comportamiento local del hidrógeno y el vapor en la parte inferior de la contención. Se construyó una geometría con 2.800 celdas de cálculo, formada por la atmósfera del IRWST y los compartimentos de las bombas hasta la cota de 5.15 m. Los conductos de conexión entre estos dos recintos se representaron con detalle, pues se quería conocer con exactitud el comportamiento del campo de velocidad en dichas zonas. Sin embargo, las tuberías, los conductos de ventilación y otros obstáculos del compartimento inferior de las bombas no se tuvieron en cuenta al ser muy grande el área de paso libre a la cota 5.15 m y, por lo tanto, la influencia de estos obstáculos en el comportamiento de los gases en la atmósfera del IRWST es despreciable. Finalmente, se consideró una simetría de 180° para reducir el número de celdas de cálculo y optimizar así el tiempo de CPU empleado. Esta hipótesis es una posible fuente de incertidumbres si se forma un lazo convectivo de circulación entre dos de los conductos de conexión (este caso fue estudiado por separado).

De los cálculos realizados con MELCOR se tomaron las condiciones de contorno a imponer en el código CFX. Éstas son, fundamentalmente, la temperatura de entrada a la atmósfera del IRWST de los gases liberados, la temperatura de las paredes de hormigón del IRWST y la presión a la cota 5.15 m. Se supuso que el H₂ y vapor se liberaban uniformemente mezclados a la temperatura de 150° C y su distribución era uniforme a través de toda la superficie libre de la piscina del IRWST ⁽⁷⁾.

Además, es de destacar el hecho de que el código CFX 4.1C no dispone de modelo de condensación. La ausencia de este modelo añade una importante fuente de incertidumbres al cálculo debido a que la condensación reduce la cantidad de vapor presente en la atmósfera haciéndola más inflamable. A partir de los cálculos con MELCOR y de estimaciones realizadas con correlaciones para la condensación de vapor ⁽⁸⁾ se consideró que la cantidad condensada reduciría aproximadamente en un 12% la fracción de masa del vapor presente en la atmósfera.

En el estudio realizado con el código CFX se consideraron condiciones simétricas. Sin embargo, se podrían dar situaciones no simétricas, debido fundamentalmente a los lazos de convección que se forman en la contención, tanto de forma global como local. Estos lazos de convección son generados por los gradientes de temperatura y la condensación de vapor en las paredes de la contención. Además, las posibles combustiones en los recintos superiores pueden influir en los patrones de circulación de la atmósfera de la contención. Por lo tanto el efecto de estos fenómenos podría alte-

rar los lazos de circulación que se establecen en la atmósfera, e incluso alterar la simetría antes mencionada, produciéndose un flujo a contra corriente en alguno de los conductos que unen la atmósfera del IRWST con los compartimentos superiores.

Estudios más detallados realizados con MELCOR por el otro experto participante en este ejercicio evidenciaron esta posibilidad ^[9]. En algunos de los cálculos se observó que, al reducirse la tasa de inyección de H_2 y vapor, la simetría del campo de velocidades se rompía y se establecía un lazo cerrado de circulación entre dos de los conductos del IRWST. Esto trajo consigo la entrada de aire desde partes superiores de la contención, facilitando la desinertización de la atmósfera y por lo tanto acarreado un incremento en la probabilidad de combustión.

Para poder estudiar en detalle este fenómeno con CFX se realizó un cálculo (CASO 2) en el que se imponía dicha recirculación en uno de los conductos a partir de los 711 s. Las condiciones de contorno de este caso fueron extraídas de los cálculos realizados por el otro experto ^[9] por la indisponibilidad de tiempo para realizar cálculos más detallados con MELCOR.

E.3. Resultados

El primer cálculo realizado con el código CFX (CASO 1), consistió en estudiar la atmósfera del IRWST suponiendo un comportamiento simétrico. En este caso se observó una alta concentración de vapor durante toda la secuencia accidental, debido a que la atmósfera inicialmente se encontraba saturada en vapor (100% de grado de humedad) y por la gran cantidad de vapor liberada a través de la piscina. Se calcularon concentraciones por encima de 0.60 kg de vapor /kg de mezcla (figura E.1) en toda la atmósfera.

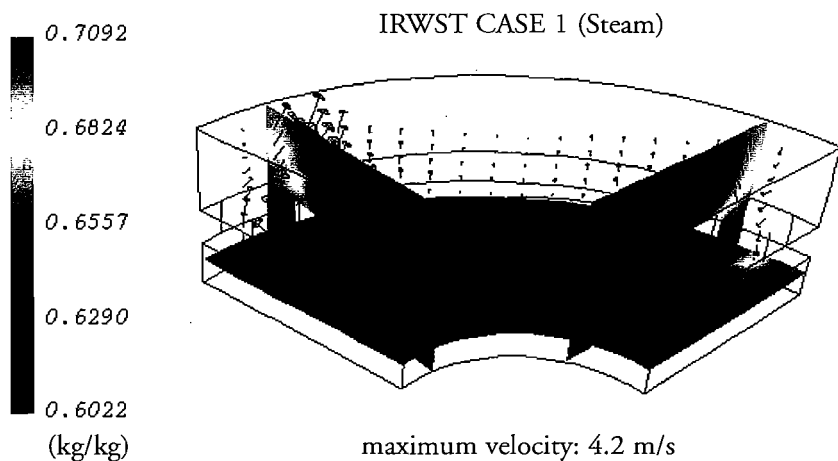


Figura E.1. Caso 1 Fracción de masa de vapor y campo de velocidades en el IRWST y recinto inferior de las bombas a los 1000s.

Además, el H_2 en la atmósfera del IRWST se encontraba distribuido de forma uniforme con una concentración de 0.40 kg de H_2 / kg, mientras que en el recinto inferior de las bombas la fracción de masa era mínima (figura E.2).

Por lo tanto se observa que la atmósfera es inerte tanto en el IRWST, debido a su bajo contenido en aire, como en el recinto del lazo, por su bajo contenido en H_2 . Sin embargo, en los conductos de venteo que unen ambos compartimentos y en su entorno, la composición H_2 /vapor/aire está más cerca de los límites de inflamabilidad, por la dilución del H_2 y vapor en una cantidad mayor de aire. Estas zonas son las más críticas para la combustión de H_2 .

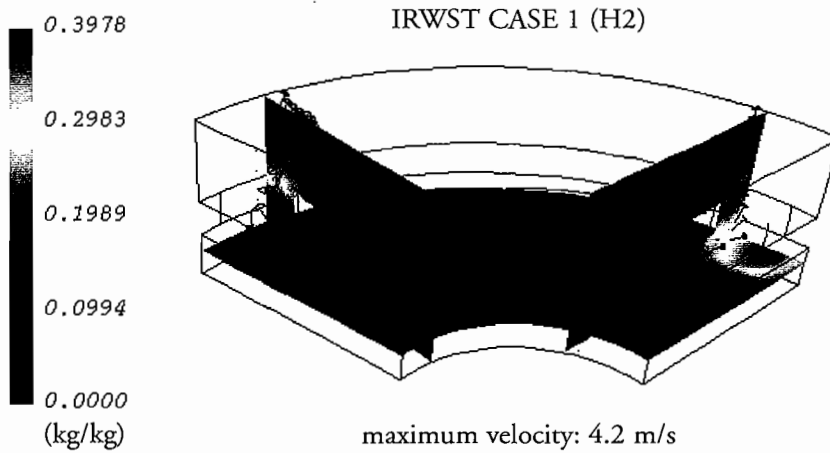


Figura E.2 Caso 1. Fracción de masa de H_2 y campo de velocidades en el IRWST y recinto inferior de las bombas a los 1000s.

Los patrones de circulación también fueron estudiados en detalle. En las figuras E.1 y E.2 se observa cómo el flujo ascendente desde la superficie de la piscina se dirige hacia los conductos con una velocidad máxima de 4.2 m/s. Sin embargo, el comportamiento de dicho flujo no es totalmente simétrico: en uno de los conductos la velocidad es menor que en el otro y se produce una bolsa de H_2 /vapor/aire más inflamable.

En el Caso 2 se impuso un flujo a contracorriente a través de uno de los conductos a partir de los 711s. El comportamiento de la atmósfera antes de este instante es muy semejante a la del Caso 1, observándose condiciones muy similares a las antes descritas debido a que muy pronto se alcanza un comportamiento estable de la mezcla H_2 /vapor/aire. Sin embargo, la secuencia cambia totalmente después de la inversión del flujo, ya que una gran cantidad de aire entra en la atmósfera del IRWST a través de dicho conducto. El aire diluye la mezcla H_2 /vapor, disminuyendo la fracción de masa de vapor hasta 0.3, lo que significa que en estas zonas la atmósfera deja de estar inertizada (figura E.3).

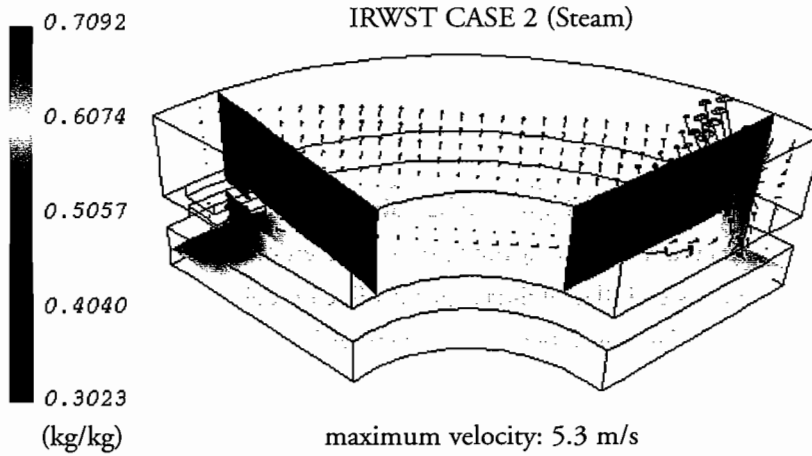


Figura E.3 Caso 2. Fracción de masa de vapor y campo de velocidades en el IRWST y recinto inferior de las bombas a los 1000s.

Además, la fracción de masa de H_2 también se redujo en la zona de dilución antes comentada, llegándose a valores de 0.1 kg de H_2 /kg (figura E.4). Esto, unido a la disminución de la concentración de vapor en dicha zona, conduce a la formación de mezclas inflamables y por lo tanto al aumento de la probabilidad de combustión en este segundo caso respecto del primero.

En cuanto a los patrones de flujo, éstos también se alteraron por el flujo en contracorriente inducido en el cálculo. La velocidad máxima aumentó ligeramente (5.3 m/s) y se estableció un lazo de circulación entre los dos conductos (figuras. E.3 y E.4).

E.4. Análisis y predicciones

Para el estudio de la inflamabilidad de las mezclas gaseosas se utilizó el diagrama de Shapiro y Moffette ^[6], como se ha comentado anteriormente. En dicho diagrama se representan las posibles mezclas de H_2 /vapor/aire agrupándolas en tres categorías: mezclas inertes, mezclas deflagrables y mezclas detonables.

Dicho diagrama se transformó en un diagrama bidimensional de vapor/ H_2 y en fracciones de masa en vez de volumen. Para ello se ajustaron unas curvas de regresión lognormales sumadas a líneas rectas, que se adaptaban muy bien a los puntos del diagrama original. Para poder agrupar las mezclas en función de su probabilidad de combustión se definió una familia de curvas obtenidas a partir de las anteriores, que variaban en función de un parámetro al que se llamó índice de inflamabilidad (i) (figura E.5).

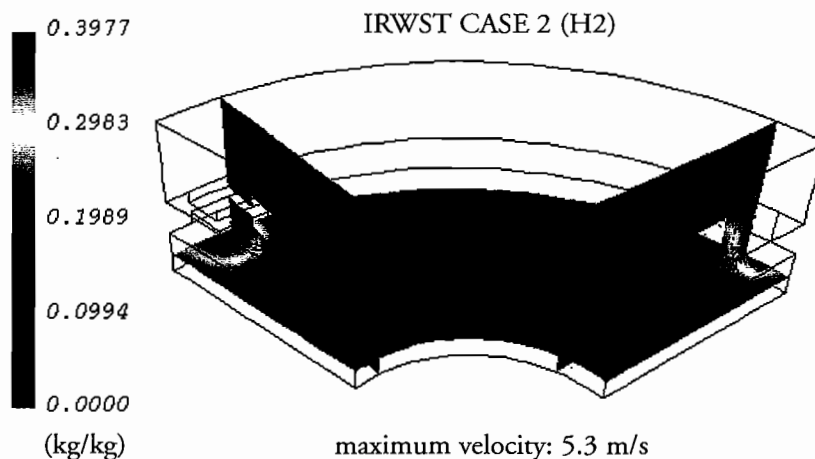


Figura E.4 Caso 2. Fracción de masa de H₂ y campo de velocidades en el IRWST y recinto inferior de las bombas a los 1000s.

Además, se tuvo en cuenta el tiempo durante el cual la mezcla permanecía en condiciones de inflamabilidad para asignar las probabilidades de combustión. Para considerar este parámetro se utilizó el concepto de frecuencia de ignición, que da la probabilidad de que una mezcla inflamable arda en función del tiempo en que dicha mezcla permanece en esas condiciones. Este concepto expresado en "vida-media" fue tomado de uno de los expertos para Grand Gulf del informe NUREG/CR-4551^[10]. Finalmente, aunque se consideró una masa mínima de gas inflamable, no se tuvo en cuenta la masa de gas a la hora de variar la probabilidad debido a que no se formaron masas de gas inflamable de tamaños muy diferentes.

Teniendo en cuenta el índice de inflamabilidad y el tiempo durante el cual la mezcla se encontraba en condiciones de inflamabilidad, se calcularon las probabilidades de combustión para las diferentes mezclas de CASO 1 y CASO 2. Estas probabilidades se expresaron en forma de distribución de probabilidad considerándose las incertidumbres en los cálculos y en la estimación de la probabilidad de combustión.

Las incertidumbres fueron fundamentalmente la geometría del recinto inferior de las bombas y su presión de contorno; las incertidumbres en la masa y energía de las fuentes de H₂ y vapor; y los errores en los cálculos debido a los modelos de turbulencia, métodos de discretización de las ecuaciones, espaciado de la malla espacial y temporal y método de resolución de las mismas. Además, la concentración de vapor fue considerado el parámetro más crítico en la probabilidad de combustión y el que más contribuía a su incertidumbre. Estas incertidumbres son debidas fundamentalmente a la fuente de vapor que, atravesando la piscina del IRWST, llegaba a la atmósfera y su condensación sobre las paredes. Por lo tanto, la concentración de vapor en la atmósfera sería seguramente menor que la que reflejaron los cálculos. Cálculos realizados con MELCOR y

utilizando las correlaciones para la condensación del vapor ^[8] permitieron estimar la cantidad de vapor condensado en torno a un 12% de la cantidad presente en la atmósfera, calculada con CFX. A partir de aquí se consideró al evaluar la distribución de la probabilidad de combustión, una reducción de la cantidad de vapor entre un 0% y un 50% de la cantidad calculada, considerándose los valores en torno al 12% de reducción como los más probables.

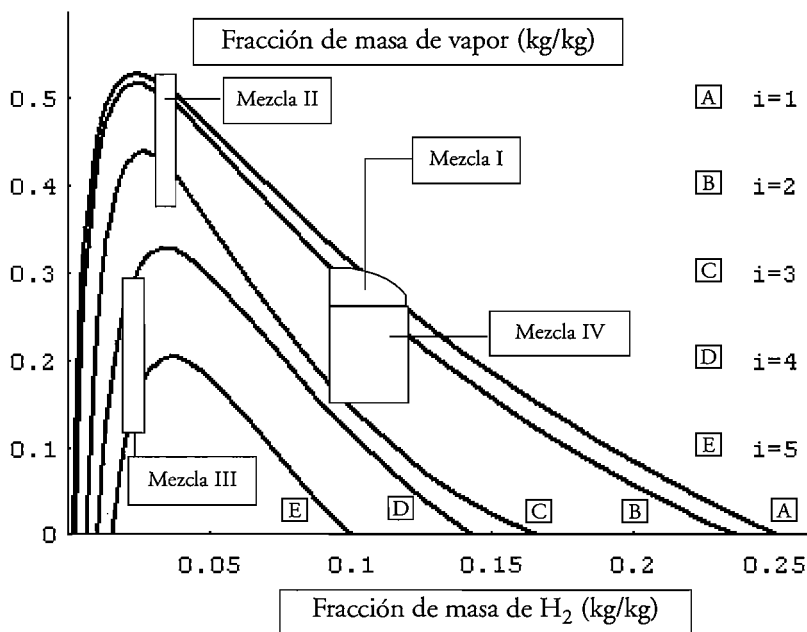


Figura E.5. Mezclas inflamables en Caso 1 y Caso 2.

En cada caso, la distribución de la probabilidad fue estimada para la deflagración y la detonación. Las probabilidades de combustión fueron combinadas para los diferentes instantes y masas de gas con diferentes índices bajo la hipótesis de suceso independiente en la probabilidad de no combustión. Las mezclas inflamables se muestran en la tabla E.1 y figura E.5.

Tabla E.1. Mezclas inflamables en Caso 1 y Caso 2

Mezcla	Caso	i(min.)	i(máx)	Máx. vapor inflamable	Tiempo (s)	Inflamabilidad
I	1	<1	-1	-50%	125-1000	baja i.
II	2	<1	-3	-28%	5-711	baja i. e inflamable
III	2	<3	<5	+10%	711-1000	alta y extremadamente i.; detonable y altamente d.
IV	2	<1	-3	-20%	711-1000	baja i. e inflamable
Resto de mezclas						no inflamable

Además, un lazo de recirculación podría ocurrir en uno, dos o ninguno de los cuatro conductos de unión. Por lo tanto, teniendo en cuenta estos criterios, se combinaron las probabilidades antes calculadas en tres situaciones. La primera situación correspondía al CASO 1 en las dos partes del IRWST cuya probabilidad se estimó muy alta (70%). La segunda situación considerada, la no simétrica, tendría probabilidad bastante menor (25%) y correspondería al CASO 1 en una de las partes y el CASO 2 en la otra. Y, finalmente, la tercera situación, de probabilidad muy baja (5%), en la que se consideraría el CASO 2 en las dos mitades del IRWST.

Finalmente, para responder a las tres preguntas del ejercicio se combinaron las distribuciones de probabilidad de deflagración, propagación y detonación para las distintas mezclas con las situaciones anteriormente descritas por medio de árboles de sucesos que tenían en cuenta los fenómenos implicados en cada pregunta. Esto se realizó durante las sesiones de elicitación, y se refleja en la parte de este informe correspondiente a los resultados obtenidos durante dichas sesiones.

E.5. Conclusiones

La utilización de códigos de cálculo ha sido considerada de gran utilidad en este ejercicio de juicio de expertos. Sin embargo, las incertidumbres en los cálculos y las carencias demostradas por los códigos han justificado la necesidad de este ejercicio.

La utilización de un código de fluidodinámica computacional (CFD) como es el código CFX ha demostrado su capacidad para el estudio de problemas de distribución de H_2 . Los fenómenos de acumulaciones locales, y los gradientes de concentración de vapor e H_2 han sido calculados adecuadamente. Además, se ha demostrado el valor de estos códigos a la hora de localizar los puntos más críticos para la combustión de H_2 que no pudieron ser localizados con el código MELCOR.

Finalmente, es interesante destacar el hecho de que la probabilidad de combustión podría aumentar si el estudio se extendiese hasta después de la fase de liberación, debido a que la probabilidad de que se cerrase un lazo de recirculación aumentaría y, por lo tanto, disminuiría la concentración de vapor en el IRWST. Por otro lado, en secuencias con menor cantidad de vapor, la probabilidad de combustión podría incrementarse por la acumulación de H_2 en la atmósfera sin inertizar del IRWST.

Referencias bibliográficas

- [1] Martín-Valdepeñas J. M., *Application of the CFX 4.1C Code to H_2 Problem in an Evolutionary Reactor Concept*, CTN-UPM, CTN-01/98, January 1998.

- [2] Martín-Valdepeñas J. M., Jiménez M. A., Martín-Fuertes F., Coordinador CSN : Robledo F., *Revisión de Experimentos de Mezcla y Distribución de H₂ en Contención*, CTN-UPM, CTN-20/96, Septiembre 1996.
- [3] Summers R. M., Cole Jr. R. K., Smith R. C., Stuart D. S., Thompson S. L., Hodge S. A., Hyman C. R., Sanders R. L., *MELCOR Computer Code Manuals (version 1.8.3 Sept 1994) Vol 1: Primer & User's Guides y Vol 2: Reference Manuals*, SNL, NUREG/CR-6119, SAND93-2185, March 1995.
- [4] AEA Technology, Computational Fluid Dynamics Services, *CFX 4.1 Flow Solver User Guide*, Harwell, UK, October 1995.
- [5] Breitung W., Royl P., Travis JR., Wilkening H., *Analysen zur Wasserstoff-Verteilung*, Atomwirtschaft 41(1996) 411. (W. Breitung *The Behaviour of Hydrogen in Containment* Lecture 11 of EUROCURSE-97 : *Analysis of Severe Accidents in Light Water Reactors*, Madrid, 13-16 October, 1997).
- [6] Camp AL, et al., *Light Water Reactor Hydrogen Manual*, SNL, NUREG/CR-2726, SAND82-1137, August 1983.
- [7] Freudenstein, *Hydrogen Distribution and Combustion in EPR Containment. 3D Calculations with FLUTAN Code*, Siemens Work Report, KWU NDS2/95/E2521, Erlangen, Germany, July 19th, 1995.
- [8] Collier J. G., *Convective Boiling and Condensation*, McGraw-Hill, England 1981.
- [9] Jiménez, M. A., *Application of the MELCOR 1.8.3 Code to a H₂ Problem in an Evolutionary Reactor Concept*, CTN-UPM, CTN 02/98, January 1998.
- [10] Harper F. T. et al., *Evaluation of Severe Accident Risk: Quantification of Major Input Parameters (Experts' Determination of Containment Loads and Molten Core Containment Interaction Issues)*, NUREG/CR-4551, SAND86-1309, Vol. 2, Rev. 1, Part 2, Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA, April 1991.

El Juicio de Expertos

Colección
Otros Documentos CSN