



## Documentación

# NTP 377: Fiabilidad humana: métodos

Fiabilité Humaine: Méthodes  
Human Reliability: techniques

### Redactora:

M. Isabel de Arquer  
Lda. en Psicología

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

*En esta Nota Técnica se presentan dos técnicas que se emplean para el análisis de la fiabilidad humana, el modelo y las hipótesis subyacentes a cada una, así como referencias bibliográficas que permitan un conocimiento más exhaustivo de las mismas. Para cada una se describe su objetivo, las etapas de procedimiento, las ventajas, los límites y las áreas de aplicación.*

## Introducción

El desarrollo de los métodos de análisis de fiabilidad humana ha estado estrechamente ligado al funcionamiento de la industria nuclear, para contribuir a las evaluaciones globales del riesgo en una instalación. Esto no quiere decir que estos métodos sólo sean aplicables en centrales nucleares, pues también se han introducido en otras industrias, pero es en el sector nuclear donde se han concentrado la mayoría de los estudios sobre la fiabilidad humana durante los últimos años. Ello se explica por el «miedo» que suele provocar todo aquello que se refiere a lo nuclear.

Esta preocupación de la población, por la seguridad de la producción de energía nuclear ha crecido desde la catástrofe de Tchernobyl. Para obtener la aceptación de la población y la autorización para su puesta en marcha, el diseño de los reactores nucleares debe satisfacer los principales objetivos de seguridad. Los análisis de probabilidades de riesgos permiten, en primer lugar, identificar las zonas potenciales de riesgo significativo donde pueden introducirse mejoras y, en segundo lugar, permiten cuantificar el riesgo global que presenta una instalación potencialmente peligrosa.

Pero estos análisis deben acomodar de forma satisfactoria la contribución humana al riesgo de accidente (a los fallos y a su recuperación) lo que ha impulsado numerosas tentativas de conversión de las tasas de error humano en las unidades numéricas requeridas por el análisis de probabilidades de riesgos. Las dos técnicas de análisis de la fiabilidad humana que aquí se presentan son: Technique for Human Error Rate Prediction (Técnica para la predicción de la tasa de error humano, THERP) y Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach (Método para la predicción y reducción del error humano sistemático, SHERPA).

## Technique for human error rate prediction (Therp)

Es una técnica que ha recibido toda clase de superlativos. Es, probablemente, el medio

más conocido y más utilizado para suministrar datos sobre la fiabilidad humana a los estudios de evaluación de probabilidades de riesgos. Sus procedimientos y su principio se describen en las 300 páginas del Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications (Swain A. D. y Guttman H.E., 1983), así como en numerosas publicaciones.

La técnica THERP es una de las más antiguas, sus orígenes se remontan al principio de los años sesenta y, en el manual actual, su principal artífice, Alain Swain, se esfuerza en comunicar sus treinta años de experiencia a las nuevas generaciones de analistas de la fiabilidad humana. Quizá por su gran utilización y por la eficacia de su difusión es por lo que también ha recibido más críticas que otros métodos de análisis de fiabilidad humana. Sin embargo, está considerada como «probablemente la mejor de las técnicas actualmente disponibles» y se encuadra entre los métodos predictivos y cuantitativos de análisis de fiabilidad humana.

El objetivo de la THERP es «predecir las probabilidades de error humano y evaluar el deterioro de un sistema individuo-máquina causado por los errores humanos (tomados aisladamente o en relación con el funcionamiento de los equipos técnicos), por los procedimientos o las prácticas de ejecución, así como por las otras características del sistema o de la persona que influyen en el comportamiento del mismo» (Swain & Guttman, 1983).

La hipótesis de base de la THERP (como es el caso de la mayoría de las aproximaciones de la evaluación de fiabilidad humana que proceden por descomposición) es que se pueden considerar las acciones de la persona desde el mismo punto de vista que el buen o mal funcionamiento de una bomba o una válvula. Considera a la persona como fuente de fallos y, así, la fiabilidad humana puede evaluarse de la misma manera que la de un dispositivo técnico. Las tareas de la persona se descomponen en actividades elementales de las cuales se puede evaluar la fiabilidad de forma más o menos tradicional, con algunos ajustes ligados a la mayor variabilidad y a la mayor interdependencia de las actividades humanas.

Las etapas de procedimiento que se desarrollan en la aplicación de la THERP son muy parecidas a las de una evaluación de probabilidades de riesgos. Son las siguientes: identificación de las funciones del sistema que puedan verse afectadas por errores humanos; análisis de las tareas; estimación de las probabilidades de error humano y de sus efectos sobre el sistema; recomendaciones para modificar el sistema y nuevo cálculo de la probabilidad de fallo del mismo.

### **Identificación de las funciones del sistema**

Se trata de identificar las funciones del sistema, los puntos débiles del mismo que puedan verse afectados por errores humanos. Para cada función se identifican las operaciones elementales realizadas por la persona (por ejemplo: cerrar una válvula).

### **Análisis de las tareas**

El listado, descripción y análisis exhaustivo de las tareas de la/s persona/s, de los errores posibles relacionados con ellas y de los modos de recuperación, permite identificar las subtareas, operaciones elementales claves y las informaciones necesarias para su correcta realización. En cada etapa se debe determinar qué errores pueden producirse. Según Kirwan, la técnica THERP trata la identificación del error de diferentes formas. El método más sencillo considera los modos de error externo posibles en cada etapa del

proceso de la tarea que se va a analizar. Éstos son:

- Errores por omisión.
- Errores de acción: en la selección, en la secuencia, en la planificación temporal y en la realización.

También clasifica las conductas e identifica los factores que influyen en la respuesta de la persona (PSF). Para guiar el análisis, esta técnica incluye la utilización de una estructura de árbol de sucesos que articula cronológica y secuencialmente las diferentes actividades y presenta la combinación de los errores relativos a diferentes operaciones elementales, así como los puntos de la secuencia en los que es posible recuperar un error (por ejemplo: por el disparo de una alarma o por comprobaciones de otra persona).

### Estimación de las probabilidades de error humano

Se estiman las probabilidades pertinentes de error, apoyándose a la vez en juicios de expertos y en los datos disponibles.

El instrumento de base para el análisis es un tipo de árbol de sucesos llamado diagrama en árbol de probabilidades. Las ramas representan decisiones binarias que fuerzan la elección entre la realización correcta o incorrecta de la actividad. Cada rama representa una combinación de actividades humanas y los determinantes supuestos de estas actividades, es decir, los factores que configuran la actividad (PSIF). El árbol de sucesos comienza en un punto conveniente del sistema y procede prospectivamente en el tiempo; cada una de las acciones elementales descritas por las ramas del árbol son probabilidades condicionadas.

La consideración de la influencia de algunos factores (PSF) sobre el desempeño de la persona es la mayor concesión que la técnica THERP hace a la naturaleza humana del individuo, en tanto que fuente de error. Estos factores (experiencia, nivel de estrés, etc.) se utilizan para modificar las probabilidades nominales de error humano (PEH) según los juicios aportados por los analistas sobre el entorno de trabajo, la calidad de la interrelación individuo-máquina, las habilidades, la experiencia de la persona concreta que está en el puesto y sobre el nivel y el tipo de estrés de la situación.

Esta técnica ofrece veintisiete tablas de probabilidades de errores humanos (presentadas en la 4ª parte del manual de 1983) cuyos valores son probabilidades nominales, es decir, la probabilidad de que se cometa un error cuando se realiza una actividad elemental dada (ver tabla 1 a modo de ejemplo). Estos valores son genéricos pues se basan en las opiniones de expertos, en datos recogidos en situaciones reales y en actividades que simulan las que realizan los operadores de una central nuclear. Cada una de estas tablas se refiere a errores específicos, asociados a actividades concretas (por ejemplo: «reconocer un estado incorrecto utilizando adecuadamente un check-list durante una inspección») y para cada componente de la actividad se dan generalmente dos valores numéricos:

1 - La probabilidad nominal de error humano (en el ejemplo anterior:  $P_0 = 10^{-2}$ )  
y

2a - El factor de error (la raíz cuadrada de la relación entre el límite superior y el límite inferior de incertidud) o

2b - Los límites superior e inferior de la probabilidad de error humano considerada. Estos límites superior e inferior corresponden respectivamente al 95 y al 5 percentiles, sobre una escala de probabilidad de error humano de distribución logarítmico-normal (en el ejemplo, los límites estimados de  $P_0$  serían:  $5 \cdot 10^{-3}$  y  $5 \cdot 10^{-2}$ ).

**Tabla 1: Probabilidad de errores de omisión**

TAREA	PEH
<b>PROCEDIMIENTOS CON LISTA DE COMPROBACIÓN</b>	
< = 10 ítem .....	0,001 (0,0005 a 0,005)
> 10 ítem .....	0,003 (0,001 a 0,01)
Comprobaciones usadas impropiamente .....	0,5 (0,1 a 0,9)
<b>PROCEDIMIENTOS SIN LISTA DE COMPROBACIÓN</b>	
< = 10 ítem .....	0,003 (0,001 a 0,01)
> 10 ítem .....	0,01 (0,005 a 0,05)

Tabla reproducida de CREUS SOLÉ, A. *Fiabilidad y Seguridad*. Ed. Marcombo S.A. Barcelona, 1992, pg. 267 (extraída a su vez, del manual de A. D. Swain y H. E. Guttman, NUREG/CR-1278 de 1983).

El analista debe ajustar las probabilidades nominales de error humano, en función de su apreciación de los efectos de los PSF. Las características de la situación se pueden considerar de forma global, escogiendo el valor superior para las condiciones más desfavorables y el valor inferior en el caso contrario. Además, en los cálculos se tiene en cuenta la posibilidad de recuperación o no de una acción, utilizando probabilidades condicionadas.

En resumen, la probabilidad  $P(E)$  de un error elemental se obtiene por la fórmula:  $P(E) = P_1 \times K \times P_2$ , donde  $P_1$  es la probabilidad nominal de error, que está en función de las características de la operación;  $K$  es un coeficiente de corrección (por ejemplo: según el nivel de estrés de la persona) y  $P_2$  es la probabilidad de no recuperación del error.

La primera versión de la THERP fue criticada por su concentración exclusiva en los modos de error externos y por no tener en cuenta los errores de diagnóstico o en la selección de la estrategia adecuada de recuperación.

Swain y sus colaboradores se han esforzado en revisar la técnica inicial para apartarse de una visión excesivamente comportamental y tener en consideración aspectos más cognitivos, considerar los errores de diagnóstico y otras faltas «cognitivas» (Swain y Guttman, 1983). Como fruto de este proceso de revisión (Swain y Weston, 1988), los autores informan de «frecuencias de error en función del tiempo» basándose en datos recogidos en equipos de operadores de central, a los cuales se les pide tratar mediante un simulador diferentes tipos de incidentes. Estos datos incluyen el tiempo empleado para llegar al diagnóstico correcto y el número de equipos que no han llegado al diagnóstico correcto.

Para tareas de diagnóstico, la técnica THERP informa de la probabilidad de fracaso en el diagnóstico en función del tiempo disponible para realizarlo (tiempo en minutos: desde 1 hasta  $10^3$ ). Mediante una gráfica que combina el tiempo y las características globales de la situación (según sean más favorables, normales o más desfavorables), se escoge una curva de respuesta que remite a una probabilidad de fallo en el diagnóstico. Si bien es una forma de cálculo de sencillo manejo, no da información sobre cuál es la causa del error de diagnóstico y parte del supuesto de que el carácter anómalo de la situación es detectado de forma evidente, lo cual no siempre es cierto. Así, estas revisiones ofrecen una base para la estimación de probabilidad de diferentes tipos de diagnósticos erróneos después de que se produzca un suceso.

## Estimación de los efectos de error humano

La estimación de los efectos del error humano sobre los fallos del sistema implica, generalmente, la integración del análisis de fiabilidad humana en el análisis de probabilidades de riesgos, para así determinar el peso de la "contribución humana" al fallo, y en definitiva, a la indisponibilidad del sistema o subsistema considerado.

## Recomendaciones para modificar el sistema

Un análisis riguroso debe dar información acerca de las modificaciones que se hacen necesarias para reducir la probabilidad de los errores humanos que afecten de forma importante al sistema. Cuando la técnica se utiliza para rediseño, se acompaña de una etapa posterior a la introducción de modificaciones en el sistema, en la que se realiza un nuevo cálculo de probabilidades para conocer los efectos de estas modificaciones.

## Ventajas, límites y campos de aplicación

Esta técnica de análisis de fiabilidad humana es considerada generalmente como aceptable para diversos campos de actividad pertenecientes a sistemas de alto riesgo (industrias de procesos químicos, de producción de energía nuclear, sectores aeronáutico y aeroespacial, del transporte, electrónico y de la construcción) y puede integrarse en un análisis de probabilidades de riesgos. Además, ha dado lugar al desarrollo de otras técnicas de análisis de fiabilidad humana. Sin embargo, presenta algunas limitaciones, ya que es de aplicación muy laboriosa y los análisis tienen un componente de subjetividad importante, a causa de las múltiples elecciones de valores que se deben realizar en las tablas de datos. De este modo, no siempre hay uniformidad entre distintos analistas en la identificación de errores y en los PSI que se han de considerar.

Las críticas más duras se centran en dos aspectos. En primer lugar, en el desglose de la tarea en acciones elementales, porque ello no siempre es coherente con la organización psicológica de la tarea y se cuestiona además la posible sumatoriedad o no de las acciones elementales. En segundo lugar, en el origen y la aplicabilidad a situaciones diversas de los datos que se dan en las tablas. Los críticos de orientación cognitiva exigen un modo de análisis del error más afianzado teóricamente, más descendiente y se mantienen escépticos sobre la asignación de probabilidades razonables a acciones relacionadas con situaciones muy específicas. Por último, algunos analistas podrían tender a considerar los errores de los que se tiene información en la base de datos, ignorando otros errores que pudieran ser también importantes y afectar a la tarea.

Además, para las tareas de diagnóstico o que requieran un gran nivel de decisión esta técnica no permite identificar recomendaciones exactas para disminuir la probabilidad de fallos humanos de este tipo. Sólo una persona experta en fiabilidad humana puede

determinar con precisión las modificaciones ergonómicas necesarias, para tratar sobre las causas psicológicas de algunos errores.

## **Systematic human error reduction and prediction approach (Sherpa)**

El objetivo de esta técnica desarrollada por D.E. Embrey es evaluar cualitativa y cuantitativamente la fiabilidad humana y elaborar recomendaciones concretas para reducir la probabilidad de errores humanos, especialmente en lo que se refiere a procedimientos, formación de personal y diseño de equipos. Idealmente, esta aproximación de tipo mixto debería aplicarse desde la fase de proyecto de un sistema sociotécnico, aunque de hecho, se emplea para mejorar un sistema ya existente.

Esta técnica ha sido elaborada para satisfacer las exigencias de los ingenieros y gestores de la industria nuclear, necesitados de una metodología que les permitiese analizar los errores humanos y desarrollar estrategias para reducirlos. La SHERPA integra un conjunto de técnicas que también pueden ser utilizadas de forma independiente y está basada en un análisis funcional de la conducta humana que tiene en cuenta los diferentes modos de funcionamiento de la persona, según el modelo de Rasmussen (ver **NTP 360 - Fiabilidad humana: conceptos básicos**)

Tras un análisis preliminar del sistema y la identificación de las tareas humanas necesarias para su correcto funcionamiento, la técnica SHERPA se desarrolla en diferentes módulos de análisis: análisis jerárquico de las tareas; análisis de los errores humanos; cuantificación; reducción de los errores; valoración.

### **Análisis jerárquico de las tareas**

Se trata de un método sistemático de identificación de las diferentes subtareas, de sus objetivos respectivos y de la forma en que estos objetivos se combinan para alcanzar un objetivo global. Consiste en identificar primeramente el objetivo global, desde los diferentes subobjetivos y las acciones elementales, las informaciones necesarias y los útiles de trabajo que permiten alcanzarlos.

En cada nivel se determina la operación elemental y las operaciones subordinadas, así como los planes utilizados por las personas para conseguir el objetivo o la meta fijado. Este análisis puede realizarse a partir de entrevistas a los trabajadores, observaciones en el puesto de trabajo, análisis de procedimientos o directrices prescritas y de las descripciones previas de las tareas existentes.

Se obtiene entonces una lista detallada de las actividades y de los objetivos elementales, para una tarea dada. Estas diferentes actividades pueden clasificarse según la experiencia y formación de la persona que las realiza, según cuatro categorías de procesos mentales (elaborados a partir del modelo de Rasmussen):

1. Basado en las habilidades o automatismos.
2. De diagnóstico basado en reglas.
3. Basado en reglas del tipo: si «x», entonces «y».
4. Basado en los conocimientos.

Esta clasificación de la técnica SHERPA facilita el encuadre de los diferentes errores posibles, pero necesita algunas precisiones:

- La técnica predictiva de los errores sólo es aplicable para las tres primeras categorías (para la cuarta, están en fase de desarrollo otras técnicas);
- Las características de los procedimientos y el diseño de los equipos (sobre todo de información) son diferentes para cada categoría.

## **Análisis de los errores humanos**

Esta técnica está basada en una estrategia de búsqueda sistemática para la identificación de los errores humanos, según cinco etapas:

Etapa 1: Definición de los pasos de una tarea que no pueden ser omitidos o modificados, sin afectar la probabilidad de lograr el objetivo o meta. Esta etapa del módulo de análisis se realiza conjuntamente entre los expertos en fiabilidad humana, los diseñadores y los gestores del sistema. Consiste en identificar los objetivos del sistema que se va a estudiar, las personas que intervienen y sus tareas precisas. Se obtiene así una lista de las tareas necesarias para lograr los objetivos del sistema.

Etapa 2: Análisis de la fiabilidad de la tarea, que incluye los siguientes pasos: definición de los criterios de éxito de las tareas elementales y globales; identificación de los puntos de recuperación posible; identificación de las acciones erróneas cuya recuperación es poco probable en un tiempo aceptable; identificación de los mecanismos psicológicos subyacentes al error; evaluación de las condiciones de detección o de recuperación del error; aplicación de técnicas de evaluación cuantitativas de la fiabilidad humana; determinación de las probabilidades de recuperación de un error, por si son suficientemente elevadas para permitir ignorar tal error.

Etapa 3: Análisis del impacto del error sobre todos los elementos relacionados con él.

Etapa 4: Análisis del efecto de las disfunciones, sean de origen material, del procedimiento humano.

Etapa 5: Recomendaciones para reducir los errores.

## **Cuantificación**

Este módulo es discrecional. Cuando es suficiente con una evaluación cualitativa, el desarrollo de la técnica SHERPA puede pasar directamente al módulo de reducción de errores. El análisis cuantitativo se realiza mediante Success Likelihood Index Methodology (SLIM), con la que se obtienen índices de probabilidad de éxito para las tareas (considerando los PSF correspondientes) que deben traducirse en términos de probabilidades.

## **Reducción de los errores**

Se refiere a la aplicación de los resultados obtenidos en los módulos precedentes. Los resultados del análisis jerárquico de tareas y del análisis de los errores humanos deberían posibilitar la propuesta de recomendaciones para mejorar los procedimientos de trabajo, la formación y adiestramiento del personal, el diseño del equipo, etc.

## Valoración

Al ensayo de la introducción de recomendaciones, le debe seguir el control de su eficacia gracias a una fase de valoración. Ésta necesita que exista una evaluación objetiva de las conductas, anterior y posterior a las modificaciones. La ineficiencia de las innovaciones, significaría que la solución era inadecuada o que hay factores contaminantes no analizados, que están afectando a las conductas. Es especialmente importante detectar aquellos factores más generales, tales como la motivación, la dirección o variables sociotécnicas que pudieran estar interfiriendo. Si la valoración resulta satisfactoria, la implementación de las mejoras ensayadas puede hacerse extensiva.

## Ventajas, límites y campos de aplicación

La técnica Sherpa se ha aplicado en sectores de actividad de alto riesgo (nuclear), sector servicios (correos), actividades de extracción de carbón en minas y plataformas petrolíferas.

Sus principales ventajas son:

- Su utilización es relativamente sencilla para los no especialistas que tengan un mínimo de formación;
- La aplicación de modelos cognitivos facilita la comprensión y la reducción de los errores;
- Su orientación hacia la propuesta de recomendaciones;
- Trata el error como un elemento informativo (de modo positivo).

Esta técnica resulta adecuada para tareas en las que la actividad humana está en el nivel de funcionamiento basado en las habilidades (automatismos) o en la aplicación reglas. Sin embargo, los errores que se producen en el tercer nivel de funcionamiento humano (basado en conocimientos) son poco predecibles. Otras limitaciones que presenta son:

- La escasa madurez de algunos módulos.
- Su inserción en el análisis tradicional de probabilidades de riesgos, aún en desarrollo.
- La siempre discutible utilización de juicios de expertos en la cuantificación.
- La no consideración de los aspectos temporales de una tarea.
- La validez de los datos obtenidos no puede traspasarse de un sistema a otro.

También se obtienen, como con la técnica THERP, diferentes resultados cuando la utilizan distintos analistas.

Las principales diferencias entre Therp y Sherpa consisten en los análisis que se realizan de la tarea y de los errores. El análisis jerárquico de la tarea de Sherpa procede a una descomposición funcional, teniendo en cuenta «unidades de conducta» relacionadas con los objetivos y subobjetivos con sentido para la persona (no «acciones elementales» como el Therp). El análisis de los errores de Sherpa tiene respecto al Therp las ventajas siguientes:



- Considera no sólo el origen funcional del error, sino también el nivel de funcionamiento de la persona y
- Los expertos a los que se acude para el módulo de cuantificación son personas implicadas en el sistema que se estudia.

## Bibliografía

(1) INSTITUT DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT  
**L'état de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine**  
 Toulouse (France), Ed. Octares, 1994.

(2) REASON, J.  
**L'erreur humaine**  
 Paris, Presses Universitaires de France, 1993.

(3) LEPLAT, J., TERSSAC, G.  
**Les facteurs humains de la fiabilité**  
 Marseille (France), Ed. Octares, 1990.

(4) KIRWAN, B.  
**Human error identification in human reliability assessment. Part.1: overviews of approaches. Part.2: Detailed comparison of techniques.**  
 Applied Ergonomics, 1992, vol.23 nº 5 y 6.

(5) FADIER, E., GUILLERMAIN, H.  
**Fiabilité Humaine. Aspects qualitatifs et/ou quantitatifs**  
 Préventique (pg.44-70) nº 14, Mai 1987.

(6) FADIER, E.  
**Concepts, critères et outils d'analyse et d'évaluation de la fiabilité des procès**  
 Sécurité (pg. 6- 10) nº 11, Mars 1984.

(7) CREUS SOLÉ, A.  
**Fiabilidad y Seguridad.**  
 Barcelona, Ed. Marcombo S.A., 1992

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA TÉCNICA THERP:

(8) SWAIN, A.D. y GUTTMAN, H.E.  
 Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. N.U.R.E.G./C.R.- 1278, Albuquerque N.M. (US), Sandia Nuclear Laboratories, 1983.

(9) SWAIN, A.D. & WESTON, L.M.  
 An approach to the diagnosis and misdiagnosis of abnormal conditions in post-accident sequences in complex man-machine systems, en L. GOODSTEIN, H. ANDERSEN & S. OLSEN (Eds.), Tasks, Errors and Mental Models, London, Taylor & Francis, 1988.

(10) WEBLEY and ACKROYD (1986)  
 The THERP Model: Course notes for the use with lecture on THERP, Human Reliability Assessment Course. The London Press Center 9/1 Oth September 1986. IBC Technical Service Ltd.

(11) HENSLEY, G.

(1978) Quantitative Analysis of the Buges Test Procedure, en HUMPHREYS, P. (Ed.) Human Reliability Assessors Guide. Safety and reliability Directorate. United Kingdom Atomic Energy Authority. Wigshaw Lane, Culcheth Warrington, 1988.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA TÉCNICA SHERPA

(12) EMBREY, D. E.

(1986), A systematic approach for assessing and reducing human error in process plants. Human reliability associates Ltd., Delton, Wigan, Lanes WN8 7RP England.

(13) EMBREY, D.E.

(1986), SHERPA. Systematic human error. Reduction and prediction approach. En: International topical meeting on advances in human factors in nuclear power systems, Knoxville, Tennessee, USA.

(14) HUMPHREYS, P.

(1988), Human reliability assessors guide. Safety and reliability directorate. United Kingdom Atomic Energy Authority. Wigshaw Lane, Culcheth Warrington.