

El Error Humano en Sistemas Complejos

La causa más frecuente, la menos comprendida

"No podemos cambiar la condición humana, pero podemos cambiar las condiciones en las que los humanos trabajan."

— James Reason, *Managing the Risks of Organizational Accidents* (1997)

1.1 El ser humano como componente del sistema

Todo sistema tecnológico complejo tiene componentes que pueden fallar: tuberías que se corroen, válvulas que se atascan, sensores que derivan. Los ingenieros han desarrollado herramientas sofisticadas para estimar la probabilidad de cada fallo y diseñar redundancias que los mitigan. Sin embargo, hay un componente que estuvo presente desde el primer día y que durante décadas fue ignorado en los modelos de confiabilidad: el ser humano.

Los seres humanos diseñan los sistemas, los construyen, los operan, los mantienen y, cuando algo sale mal, son los primeros en responder. En cada una de esas funciones existe la posibilidad del error. Y cuando el error ocurre en el momento y el lugar equivocados, las consecuencias pueden superar con creces las de cualquier fallo mecánico.

“

Los seres humanos son simultáneamente el mayor peligro para los sistemas de alta tecnología y su más poderosa fuente de resiliencia. Esa dualidad es el punto de partida de toda la disciplina.

— Barry Kirwan, *A Guide to Practical Human Reliability Assessment* (1994), p. 3

Esta dualidad es fundamental: el mismo operador que puede cometer un error catastrófico es también quien detecta la anomalía que ningún sensor anticipó, quien improvisa la solución cuando el procedimiento no contempla la situación, quien salva el sistema en el último segundo. El Análisis de Confiabilidad Humana no busca eliminar al ser humano del sistema; busca entender cuándo y por qué falla, para diseñar condiciones que reduzcan esa probabilidad.

1.2 La magnitud del problema

La industria comenzó a cuantificar la contribución del error humano a los accidentes industriales a partir de los años setenta. Los datos acumulados durante cuatro décadas pintan un cuadro inequívoco: en la mayoría de las industrias de alto riesgo, entre el 60 y el 90 por ciento de los accidentes graves tienen al error humano como causa raíz o factor contribuyente principal (Boring, 2012; Kirwan, 1994; Reason, 1997).

Tabla 1.1 — El error humano como causa raíz de accidentes por industria

Sector industrial	Contribución del error humano	Fuente principal
Industria marítima (navegación y puertos)	90%	Compton (2010); IMO studies
Industria química y de procesos	80–90%	Kirwan (1994); CCPS (2007)
Aviación civil y control de tráfico aéreo	60–87%	Helmreich (2000); ICAO (2013)
Industria nuclear (operación de planta)	65–85%	Boring et al. (2012); NRC (2019)
Industria offshore (petróleo y gas)	70–80%	Cullen (1990); Kirwan (1994)
Atención médica (errores clínicos)	~80%	Leape et al. (1994); IOM (2000)
Manufactura aeroespacial y defensa	55–75%	Swain & Guttman (1983); NTSB

Estos números son estadísticos, no deterministas: no significan que en el 90 por ciento de los viajes marítimos el capitán cometerá un error fatal. Significan que cuando ocurre un accidente, en nueve de cada diez casos se identifica una acción o decisión humana como factor causal. La diferencia es importante, porque el objetivo del HRA es actuar antes del accidente, no después.

El informe del Institute of Medicine de los Estados Unidos, "To Err is Human" (Kohn et al., 2000), estimó que entre 44,000 y 98,000 pacientes morían anualmente en hospitales estadounidenses como consecuencia de errores médicos prevenibles —más muertes que las causadas por accidentes de tráfico, cáncer de mama o SIDA en ese año. La cifra desató una revolución en la gestión del riesgo clínico que continúa hasta hoy.

► **CASO REAL — THREE MILE ISLAND, PENNSYLVANIA — 28 DE MARZO DE 1979**

A las 4:00 a.m., una válvula de alivio de presión que debería haberse cerrado automáticamente permaneció abierta. Los operadores de sala de control, confundidos por indicadores contradictorios y alarmas en cascada, interpretaron erróneamente el estado del reactor. Durante más de dos horas tomaron decisiones que agravaron la situación en lugar de mitigarla.

El accidente no causó víctimas directas, pero sacudió la industria nuclear mundial. La investigación posterior (Kemeny Commission, 1979) concluyó que el factor decisivo no fue el fallo mecánico de la válvula, sino la secuencia de errores cognitivos de los operadores: diagnóstico incorrecto, desconfianza en la instrumentación y adherencia excesiva a un modelo mental equivocado.

TMI fue el catalizador que convirtió el HRA de práctica experimental en requisito regulatorio. (Fuente: NRC NUREG/CR-1278, 1983; Kemeny Commission, 1979)

1.3 ¿Qué es un error humano? Definición formal

La palabra "error" tiene connotaciones morales en el lenguaje cotidiano que no tienen lugar en el análisis técnico. Para el HRA, el error humano es una categoría funcional, no un juicio de valor. La definición

más ampliamente aceptada en la literatura técnica proviene del estándar ASME/ANS RA-Sb-2013:

“

Un error humano es cualquier acción o inacción de un individuo que produce un resultado que difiere del resultado esperado o requerido dentro de los límites de tolerancia del sistema.

— ASME/ANS RA-Sb-2013, Estándar de Análisis de Riesgos para Plantas de Energía Nuclear

Esta definición tiene varias implicaciones prácticas que vale la pena destacar. Primero, el error se define en relación al resultado del sistema, no a las intenciones del individuo. Un operador puede actuar con la mejor intención y aun así cometer un error si el resultado se aparta del esperado. Segundo, la definición incluye tanto acciones (hacer algo incorrecto) como inacciones (no hacer algo que debería hacerse). Tercero, el umbral de error es funcional: depende de los "límites de tolerancia del sistema".

Tipos de error humano

Barry Kirwan (1994), sintetizando la taxonomía de Swain y Guttman (1983) y la de Reason (1990), propone una clasificación de cuatro tipos fundamentales de error que el HRA debe identificar y cuantificar:

Tabla 1.2 — Taxonomía de errores humanos en el HRA

Tipo de error	Definición	Ejemplo
Error de omisión	No realizar una acción requerida	No abrir la válvula V-12 según el procedimiento
Error de comisión	Realizar una acción incorrecta	Abrir la válvula V-13 en lugar de V-12
Error de secuencia	Realizar una acción en el orden incorrecto	Presurizar antes de purgar
Error de tiempo	Acción demasiado tarde o demasiado temprana	Intervención fuera de la ventana de oportunidad

A esta taxonomía funcional se superpone la clasificación psicológica de James Reason (1990), que distingue entre slips (deslices de ejecución), lapses (fallos de memoria), mistakes (errores de planificación) y violations (desviaciones voluntarias de los procedimientos). Estos conceptos se desarrollarán en detalle en el Capítulo 4.

1.4 El error activo y el error latente

Una de las contribuciones más importantes de James Reason a la teoría del error humano es la distinción entre errores activos y condiciones latentes. Esta distinción tiene consecuencias prácticas profundas para la forma en que diseñamos sistemas seguros.

Los errores activos son aquellos cuyas consecuencias se sienten de inmediato. Son los errores del "operador de primera línea": el técnico que aprieta el tornillo incorrecto, el piloto que selecciona la pista equivocada, el farmacéutico que despacha la dosis incorrecta. Son visibles, localizables y fáciles de atribuir.

Las condiciones latentes, en cambio, son deficiencias del sistema que permanecen inactivas durante meses o años, esperando el momento en que se combinen con las circunstancias adecuadas para producir un accidente. Surgen de decisiones de diseño, de políticas de gestión, de cultura organizacional, de presupuestos recortados. Son invisibles hasta que es demasiado tarde.

“

Las condiciones latentes son como los gérmenes del accidente. Residen en el sistema mucho antes de que el evento desencadenante ocurra. Su combinación con los actos inseguros locales es lo que produce los accidentes residentes.

— James Reason, *Managing the Risks of Organizational Accidents* (1997), p. 10

El Modelo del Queso Suizo (James Reason, 1990)

DISEÑO DEL SISTEMA	◀ Decisiones de ingeniería y arquitectura
GESTIÓN Y ORGANIZACIÓN	◀ Cultura, procedimientos, supervisión
AMBIENTE DE TRABAJO	◀ Entorno físico, equipos, herramientas
OPERADORES / EQUIPOS	◀ Competencia, fatiga, comunicación
BARRERAS / SALVAGUARDAS	◀ Alarmas, enclavamientos, controles
▼ ACCIDENTE ▼	

Un accidente ocurre cuando los "agujeros" de todas las capas se alinean, permitiendo que la trayectoria del peligro atraviese todas las defensas. Los agujeros representan tanto actos inseguros (errores activos) como condiciones latentes que existen mucho antes del accidente.

► CASO REAL — PIPER ALPHA, MAR DEL NORTE — 6 DE JULIO DE 1988

La plataforma petrolera Piper Alpha era la más productiva del Mar del Norte. Esa noche, una bomba de condensado fue sacada de servicio para mantenimiento sin que el equipo del turno siguiente lo supiera. Un operador del turno de noche, buscando restaurar la producción, arrancó una bomba redundante cuyo permiso de trabajo estaba en vigor —es decir, sus válvulas de aislamiento estaban abiertas y un tapón de obturación provisional era la única barrera entre el sistema de gas a alta presión y la atmósfera.

La fuga de gas condensado causó una explosión que mató a 167 de las 226 personas a bordo. El informe Cullen (1990) identificó múltiples condiciones latentes: un sistema de permisos de trabajo defectuoso, procedimientos de comunicación inadecuados entre turnos, y una cultura organizacional que priorizaba la producción sobre la seguridad.

Piper Alpha no fue un accidente causado por un operador negligente. Fue el resultado de que múltiples capas de defensa fallaron simultáneamente. (Fuente: Cullen, W.D. (1990). The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster. HMSO.)

1.5 Por qué los humanos fallan a pesar de las medidas de seguridad

Si los sistemas de alto riesgo tienen procedimientos, capacitación, alarmas, supervisión y redundancias, ¿por qué siguen ocurriendo accidentes por error humano? La respuesta es compleja y multifactorial, pero la investigación de las últimas décadas ha identificado los mecanismos principales:

La carga cognitiva en condiciones adversas

Los sistemas complejos generan, en situaciones anormales, una avalancha de información que supera la capacidad de procesamiento del cerebro humano. En Three Mile Island, los operadores enfrentaron más de 100 alarmas activas simultáneamente en los primeros minutos del incidente. La capacidad de la memoria de trabajo humana —entre 5 y 9 unidades de información según la teoría clásica de Miller (1956)— es radicalmente insuficiente para ese volumen de datos.

El efecto de los modelos mentales incorrectos

Los operadores experimentados construyen modelos mentales del sistema que les permiten actuar con rapidez sin necesidad de consultar cada procedimiento. Cuando el sistema se comporta de manera inesperada, estos modelos mentales pueden convertirse en trampas: el operador interpreta la nueva situación a través del filtro del modelo antiguo, tomando decisiones que hubieran sido correctas en condiciones normales pero que agravan la situación anormal.

La presión de tiempo y el estrés

La presión del tiempo degrada sistemáticamente el rendimiento humano. Rasmussen (1983) documentó cómo, bajo estrés agudo, los operadores tienden a recurrir a estrategias de comportamiento más primitivas (reglas memorizadas y hábitos) incluso cuando la situación requería razonamiento analítico. El estrés crónico —turnos prolongados, fatiga acumulada, sobrecarga de trabajo— tiene efectos igualmente documentados sobre la atención y la toma de decisiones (Kirwan, 1994; NUREG/CR-1278).

Las condiciones organizacionales

Decenas de investigaciones de accidentes han revelado que la mayor parte de las condiciones que facilitaron el error fueron creadas por decisiones organizacionales anteriores: recortes de personal que aumentaron la carga de trabajo individual, procedimientos desactualizados que no reflejaban la planta real, cultura de producción que desalentaba la comunicación de problemas, ausencia de mantenimiento preventivo que fue postergado por restricciones presupuestarias. Barry Kirwan (1994) dedica una sección específica a estas "Influencias de Gestión y Organizacionales" como una dimensión esencial del análisis de confiabilidad humana.

“

Cada accidente tiene una historia que comienza mucho antes del día en que ocurre. Esa historia está escrita en los libros de actas de los comités de dirección, en los informes de auditoría archivados sin acción, en los presupuestos que priorizaron la producción sobre el mantenimiento.

— Barry Kirwan, *A Guide to Practical Human Reliability Assessment* (1994), p. 289

► CASO REAL — CHERNOBYL, UCRANIA (URSS) — 26 DE ABRIL DE 1986

El accidente de Chernobyl es el ejemplo más estudiado de cómo las condiciones organizacionales y culturales pueden hacer inevitable un error catastrófico. En la madrugada del 26 de abril de 1986, el equipo del turno nocturno del Reactor 4 realizaba un experimento de seguridad que había sido postergado repetidamente. La presión para completar la prueba antes del cierre programado del reactor llevó a los operadores a tomar una serie de decisiones que deshabilitaron sistemáticamente los sistemas de seguridad automática.

El análisis post-accidente (INSAG, 1991) identificó tres capas de causas: (1) deficiencias de diseño del reactor que no habían sido comunicadas a los operadores; (2) procedimientos de seguridad inadecuados para el experimento; (3) una cultura organizacional soviética que desalentaba el cuestionamiento de autoridades y procedimientos.

Chernobyl demostró que el error humano en sistemas complejos no puede comprenderse sin analizar el sistema social y organizacional en el que ocurre. Este reconocimiento daría origen a los métodos HRA de segunda generación. (Fuente: INSAG-7, IAEA Safety Series No. 75 (1992))

1.6 La respuesta sistemática: el Análisis de Confiabilidad Humana

El HRA no surge como una curiosidad académica. Surge como la respuesta de la ingeniería a una necesidad concreta: si el error humano es tan prevalente y tan consecuente, necesitamos métodos sistemáticos para identificarlo, modelarlo, cuantificarlo y —sobre todo— reducirlo. Ese es exactamente el programa del HRA tal como lo definió Barry Kirwan en 1994, y tal como lo formalizan los estándares actuales.

El proceso HRA completo, que desarrollaremos en detalle a lo largo de este libro, comprende diez pasos iterativos. La figura tabla resume el ciclo:

Figura 1.1 — El proceso HRA en 10 pasos (Kirwan, 1994; adaptado)



Este proceso no es lineal. En la práctica, los pasos 7 y 8 frecuentemente retroalimentan los pasos 3, 4 y 6: cuando la evaluación de impacto revela que el riesgo no es aceptable, o cuando las medidas de reducción son implementadas, es necesario visitar la cuantificación y el modelado. El HRA es un proceso iterativo hasta que el riesgo es aceptable o hasta que se han identificado todas las medidas de reducción posibles.

En el Capítulo 2 introduciremos el marco conceptual del HRA: sus definiciones formales, su relación con el Análisis Probabilístico de Riesgos (PRA/PSA) y su lugar en la gestión de la seguridad de los sistemas complejos.

Resumen del Capítulo 1

Ideas clave del capítulo

Concepto	Implicación
El ser humano es un componente del sistema	Su fiabilidad debe analizarse con el mismo rigor que la de los equipos
El error humano domina las causas raíz	Entre el 60 y el 90% de los accidentes en industrias de alto riesgo
Error ≠ culpa	El error es un resultado del sistema, no un defecto del individuo
Errores activos vs. condiciones latentes	Ambos deben ser identificados; los latentes son más peligrosos
El proceso HRA tiene 10 pasos	Desde la definición del problema hasta la documentación, con bucle iterativo

Referencias del Capítulo 1

- Boring, R.L. (2012).** Fifty Years of THERP and Human Reliability Analysis. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 56(1), 1232–1236. Idaho National Laboratory. INL/CON-12-24520.
- Cullen, W.D. (1990).** The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster. HMSO (Her Majesty's Stationery Office), London. 2 volúmenes.
- Helmreich, R.L. (2000).** On error management: lessons from aviation. British Medical Journal, 320(7237), 781–785.
- INSAG-7 (1992).** The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1. IAEA Safety Series No. 75. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Kemeny Commission (1979).** Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Kirwan, B. (1994).** A Guide to Practical Human Reliability Assessment. Taylor & Francis, London. 601 pp.
- Kohn, L.T., Corrigan, J.M., & Donaldson, M.S. (Eds.) (2000).** To Err is Human: Building a Safer Health System. Institute of Medicine. National Academy Press, Washington D.C.
- Miller, G.A. (1956).** The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. Psychological Review, 63(2), 81–97.
- NRC (2019).** Introduction to Human Reliability Analysis. NRC-RES Fire PRA Workshop. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.
- Rasmussen, J. (1983).** Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13(3), 257–266.
- Reason, J. (1990).** Human Error. Cambridge University Press, Cambridge. 302 pp.
- Reason, J. (1997).** Managing the Risks of Organizational Accidents. Ashgate Publishing, Aldershot. 252 pp.
- Swain, A.D. & Guttmann, H.E. (1983).** Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications (THERP). NUREG/CR-1278. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.

ASME/ANS (2013). Probabilistic Risk Assessment Standard for Advanced
Non-Light-Water Reactor Nuclear Power Plants. RA-Sb-2013.
American Society of Mechanical Engineers / American Nuclear Society.