

LOS RETOS DE LA INGENIERÍA DE FACTORES HUMANOS EN EL LICENCIAMIENTO DE SMR



BORJA HERVÁS MARTÍN

Ingeniero Senior de Factores Humanos
TECNATOM S.A.



HÉCTOR MARTÍNEZ-PINNA ALBAR

Ingeniero Senior de Factores Humanos
TECNATOM S.A.

INTRODUCCIÓN

Los reactores modulares pequeños, conocidos comúnmente como SMR por sus siglas en inglés, *Small Modular Reactors*, son reactores nucleares con una potencia menor, hasta 300 MW(e) cada uno.

Son muchas las organizaciones y empresas que en los últimos años están desarrollando sus diseños, ya que estos reactores avanzados se han posicionado como una opción muy interesante para varias aplicaciones en el futuro próximo: por su versatilidad, su flexibilidad, su mínimo impacto ambiental, sus limitados costes y sus reducidos plazos de construcción.

Entre dichas aplicaciones se encuentra inevitablemente la generación de energía eléctrica, siendo también especialmente aptos por su potencia para cogeneración, producción de hidrógeno, calefacción urbana o soportes energéticos para zonas que, por su situación, la distribución eléctrica es más complicada.

Además de las grandes multinacionales del sector, nuevas empresas emergentes y laboratorios de todo el mundo se han lanzado a proponer diseños conceptuales que van más allá de los tradicionales reactores de agua presurizada o de agua en ebullición. Con diferentes tipos de refrigerante (helio, sodio líquido, etc.) y con combustibles novedosos, más seguros y que permitirían a un país hacer un ciclo cerrado de combustible, aprovechando los residuos de plantas de anteriores generaciones.

Estados Unidos, a través del Departamento de Energía, está destinando partidas muy importantes para el desarrollo de estos diseños, y muchas de estas empresas pujan actualmente por licenciar sus modelos en una carrera por posicionarse como líderes de un mercado prometedor.

Como parte del licenciamiento de los nuevos reactores, emerge la disciplina de la Ingeniería de Factores Humanos (IFH), cuyo proceso va a determinar la interacción entre el personal de operaciones y los sistemas de control de los reactores. La Ingeniería de Factores Humanos permite el diseño de todas las interfaces de operación teniendo en cuenta todos los elementos que contribuyen al error humano. Siendo su objetivo minimizar el riesgo de error humano en cualquier interacción entre el hombre y los sistemas de la planta.

La ingeniería de factores humanos en un reactor estándar de gran potencia parte de unas suposiciones y requisitos iniciales en cuanto al número de personas de operación por reactor, su cualificación y tiempo de entrenamiento. En el caso de los reactores modulares pequeños, debido principalmente a la dimensión reducida, la automatización extensiva de procesos, los sistemas de seguridad pasiva y la modularidad de los diseños, estas suposiciones tendrán que ser reconsideradas, planteando nuevos mínimos que van a necesitar ser evaluados con detalle.

LOS RETOS

La regulación estadounidense 10 CFR 50.54 establece que en una sala de control con un reactor en operación debe haber un mínimo de cuatro operadores. De la misma manera, el resto de los países con reactores de gran potencia en operación han adoptado requisitos iguales o similares según sus diseños. Si nos referimos en concreto a la regulación estadounidense, requiere un número mínimo en diferentes combinaciones hasta un máximo de tres reactores en operación, que, siendo operados desde un mínimo de dos salas de control, deberían contar con, al menos, ocho operadores. La Tabla 1 muestra las posibilidades requeridas.

Number of nuclear power units operating ²	Position	One Unit	Two units		Three units	
		One control room	One control room	Two control rooms	Two control rooms	Three control rooms
None	Senior Operator	1	1	1	1	1
	Operator	1	2	2	3	3
One	Senior Operator	2	2	2	2	2
	Operator	2	3	3	4	4
Two	Senior Operator		2	3	³ 3	3
	Operator		3	4	³ 5	5
Three	Senior Operator				3	4
	Operator				5	6

¹Temporary deviations from the numbers required by this table shall be in accordance with criteria established in the unit's technical specifications.

²For the purpose of this table, a nuclear power unit is considered to be operating when it is in a mode other than cold shutdown or refueling as defined by the unit's technical specifications.

³The number of required licensed personnel when the operating nuclear power units are controlled from a common control room are two senior operators and four operators.

Tabla 1. Requisitos mínimos de personal de operación 10 CFR 50.54 (m)(2)(i).

Esta regulación tradicional se ve sobrepasada por dos caminos en el diseño de la sala de control de un reactor modular pequeño:

1. Más de tres reactores modulares pequeños pueden ser instalados en un mismo emplazamiento y tienen por objetivo ser operados con una única sala de control. Algunos diseños contemplan la operación de hasta 12 módulos desde una única sala.
2. Debido a un alto nivel de automatización de la planta y la presencia de sistemas de seguridad pasivos, el número

total de acciones que tiene que realizar un operador será reducido, por lo que el equipo pretende ser el mínimo eficiente para cubrir esas acciones. De la misma manera, los operadores tardarán menos tiempo en ser formados, entrenados y cualificados, tratando de reducir también los programas de entrenamiento respecto a los programas de reactores de gran potencia. Algunos diseños plantean equipos de 4 a 6 operadores operando más de 10 módulos.

Estas dos premisas son tenidas en cuenta desde el comienzo del diseño de la sala de control desde el punto de vista de la Ingeniería de Factores Humanos, siguiendo las actividades y procesos marcados por los estándares internacionales en el licenciamiento.

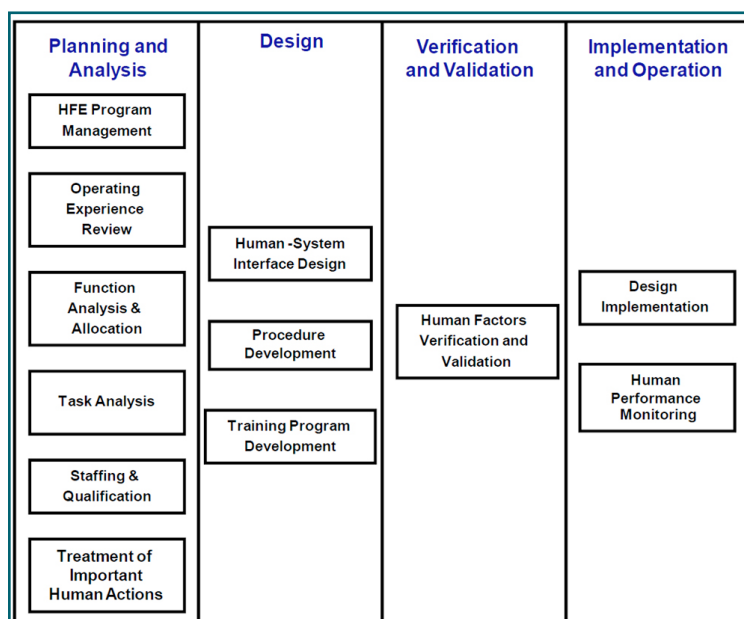


Figura 1. Elementos del Programa de Ingeniería de Factores Humanos según NUREG-0711

LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES Y EL PROCESO

La mayoría de los reactores modulares se encuentran en una fase de diseño temprana, con el objetivo de obtener la licencia en el país donde es más propicia su construcción. Durante el diseño de los sistemas y sus estaciones de control, es necesario desarrollar la IFH. Esto generalmente se hace basándose en unos procesos establecidos por estándares de Ingeniería de Factores Humanos, principalmente, por el NUREG-0711 (Figura 1) y los IEC 60964 e IEC 61839.

Sin embargo, y debido a los dos retos mencionados en el apartado anterior, dichos procesos se enfocan de una manera diferente a la habitual, centrándose en el objetivo de demostrar que los reactores pueden ser operados de ma-

nera segura con un reducido grupo de operadores desde una misma sala de control.

EL ANÁLISIS

La experiencia operativa como punto de partida

Como en la mayoría de las actividades del sector nuclear, la primera parte del trabajo consiste en revisar toda la experiencia operativa disponible relevante y analizarla. En este sentido, al tratarse de nueva tecnología se podría pensar que el análisis está limitado. Sin embargo, sí es posible encontrar en bases de datos a nivel internacional, para su posterior análisis, experiencias operativas ocurridas en reactores de potencia similar o de mayor potencia con tecnología similar.

Las conclusiones del análisis de experiencia operativa servirán como información de inicio para el resto de los procesos. Tomando acciones concretas en caso de que sea necesario. Además, este análisis sirve como punto de partida para comenzar la vigilancia mantenida en el tiempo de nuevas experiencias operativas.

Desde los objetivos de la planta hasta las funciones de cada sistema y el grado de automatización

La primera pregunta que nos hacemos es cuáles son los objetivos fundamentales de nuestra planta. Una pregunta cuya respuesta, generalmente, se divide en dos:

- Generar energía eléctrica de forma eficiente y transmitirla a la red exterior, y
- Proteger al público y al medio ambiente de potenciales emisiones radiactivas.

Las diferentes aplicaciones de los reactores modulares podrán añadir nuevas funciones, como es el caso de la producción de hidrógeno o la calefacción urbana.

El siguiente paso es descomponer los objetivos en elementos más concretos, las funciones de planta, que a su vez se descompondrán hasta llegar a las funciones de cada uno de los sistemas de planta. Estableceremos qué requisitos necesitamos controlar o visualizar en la interfaz de operación para poder cumplir dichas funciones. Además, en este punto se detallan las formas que adopta cada sistema para cumplir esa función, llamados “modos de operación” de sus equipos. Mediante la comparación de esos modos de operación se establecen los cambios en los equipos, una válvula que pasa de estar abierta a cerrada o una bomba que pasa de estar parada a encendida.

Es esperable que, debido a la automatización extensiva de la mayoría de los diseños de SMR, muchos de estos cambios pretendan realizarse de forma automática o pasiva, sin la intervención del ser humano. Sin embargo, la idoneidad de cada uno de esos cambios automáticos deberá ser evaluada, considerando las capacidades y las limitaciones de los sistemas automáticos actuales. Como resultado de la evaluación, se acepta o se propone una alternativa para el cambio automático, por ejemplo, incorporando una participación del operador.

Tras decidir si las acciones serán automáticas o realizadas por el hombre, nos quedaremos con un grupo, las realiza-

das por el hombre, que serán menos en comparación con un reactor estándar de mayor potencia, para el siguiente análisis.

Tratamiento de las acciones humanas importantes

Ahora, se trata de acotar y poner el foco en esas acciones o grupo de acciones realizadas por el hombre que se van a considerar más importantes. Principalmente porque un error podría afectar en mayor medida a la seguridad de la planta. Es en este punto donde será necesario considerar situaciones que no se tenían en cuenta en análisis de reactores estándar de gran potencia, por ejemplo:

- Escenarios de emergencia, o de operación fuera de límites, simultáneos en varios reactores.
- Operación de recarga de combustible en operación.
- Nuevas acciones o tipos de accidentes derivados de la elección de la tecnología: refrigerante, moderador, blindajes, tipo de combustible.

Una vez identificadas, el análisis propondrá un tratamiento especial para cada una de ellas.

Las tareas de operación

Con todas las tareas sobre el papel, y sabiendo cuáles de ellas son las más importantes, es el momento de analizar lo que vamos a necesitar de cada una de ellas y cómo las va a realizar el operador. Esto se lleva a cabo en el análisis de tareas.

Como ejemplo, supongamos que un operador tiene que arrancar una bomba centrífuga. Nuestro análisis nos dirá que necesitamos que la interfaz disponga de un medio que nos permita llevar a cabo esa acción sobre ese equipo. Además, necesitamos ver después que efectivamente está arrancada, entonces también necesitamos información sobre su estado en tiempo real. Por último, necesitamos una alarma que nos avise si hay riesgo de cavitación. Por tanto, para dicha tarea, necesitamos control, indicación y alarma. También se identificará si hay alguna necesidad adicional de comunicación con la planta o de apoyo, por ejemplo, consultar un gráfico.

Este proceso se sigue para todas las tareas de todos los sistemas hasta conseguir toda la lista de requisitos que deberá tener nuestra interfaz de control.

Con las tareas más importantes, iremos más allá en el análisis, las identificaremos dentro de un escenario de operación y se les asignará un responsable dentro del equipo de operación según el tipo de tarea. Ya sea un supervisor, un operador de reactor, un auxiliar eléctrico...

En el caso de los reactores modulares puede darse el caso en el que un mismo operador tenga bajo su responsabilidad varios reactores. Estos escenarios tendrán en cuenta situaciones simultáneas en varios reactores, que exigen una mayor carga de trabajo a los operadores. Teniendo que hacer frente, en el caso más crítico, a varios accidentes al mismo tiempo.

El análisis de tareas, además, servirá como información de partida para el desarrollo de los procedimientos de operación y los programas de entrenamiento. Al ser un número menor las acciones llevadas a cabo por el hombre, como ya se ha comentado, los programas de entrenamiento serán

más cortos. Por otro lado, dichos programas deberán orientarse hacia la operación simultánea de varios reactores.

Una primera aproximación al personal de la sala de control

Posteriormente se evalúa la asignación de operadores realizada en el análisis de tareas, principalmente, valorando si el tiempo de realización de la tarea es inferior al mínimo necesario.

Una vez se hayan evaluado y aceptado de esta forma todas las tareas se podrá concluir el mínimo número de operadores de sala necesario para ejecutarlas de manera segura. Además de establecer los conocimientos y aptitudes que deberán tener para poder llevarlas a cabo.

EL DISEÑO

Con las conclusiones del análisis de tareas y la lista de requisitos se definirán las interfaces de la sala de control. El grado de digitalización de la sala será alto, solamente existirán unos pequeños paneles hardware reservados para tareas que por su naturaleza crítica y estar relacionadas directamente con la seguridad, necesitan un soporte adicional de respaldo al *software*.

En el diseño, además, las guía NUREG-0700, IEEE 1023 e ISO 11064 servirán de base para establecer una guía de estilo aplicable a todas las pantallas y paneles de operación, y así conseguir la consistencia y uniformidad necesaria. Un detalle clave en cualquier diseño que tenga como objetivo reducir el error humano al mínimo.

Debido a la naturaleza de los escenarios más críticos, que comprometerán la seguridad de varios reactores al mismo tiempo, hay un tipo de pantalla que cobra importancia relevante en el diseño de estas salas, las pantallas de alto nivel, o también llamadas de alto rendimiento (Figura 2).

Estas pantallas gobernarán la sala de control y permitirán a los operadores monitorizar el estado de uno o varios reac-

tores en un tiempo reducido. Para ello, será necesario definir conforme a la guía de estilo, nuevas formas de visualización de parámetros en grupo: mediante polígonos paramétricos o mediante conjuntos de barras.

Las pantallas de alto nivel contendrán de una manera reducida el estado de cada reactor incluyendo el valor de los indicadores más importantes para la seguridad y eficiencia de los módulos en cada modo de operación.

LA VERIFICACIÓN

Por definición, la verificación consiste en comprobar que el diseño cumple los requisitos impuestos por las guías nombradas en la sección anterior. Dependiendo del volumen de interfaces a verificar, se establecerá una estrategia de selección, basada tanto en criterios de seguridad o interfaces sobre las que se realizan acciones importantes como en las propias características de estas.

Por ejemplo, la verificación de un grupo de pantallas de operación con componentes estáticos y dinámicos similares se podrá hacer escogiendo una muestra y aplicando los cambios y comentarios de la verificación a todas.

Un equipo independiente ejecuta una verificación del diseño, enfocada a encajarla con el mínimo personal de sala de control establecido anteriormente, y confirmar que las tareas a realizar en las pantallas diseñadas pueden ser correctamente ejecutadas. Seleccionando aquellas pantallas que se usarán en las situaciones más críticas, las más usadas, las que contengan acciones importantes o aquellas en las que un error humano pueda tener consecuencias más graves.

LA VALIDACIÓN

La validación es el proceso por el que se comprueba que lo diseñado cumple con su objetivo, por tanto, es el que da sentido a todos los anteriores, por el cual se aceptan o se rechazan, conforme a unos criterios de validación, los siguientes puntos:

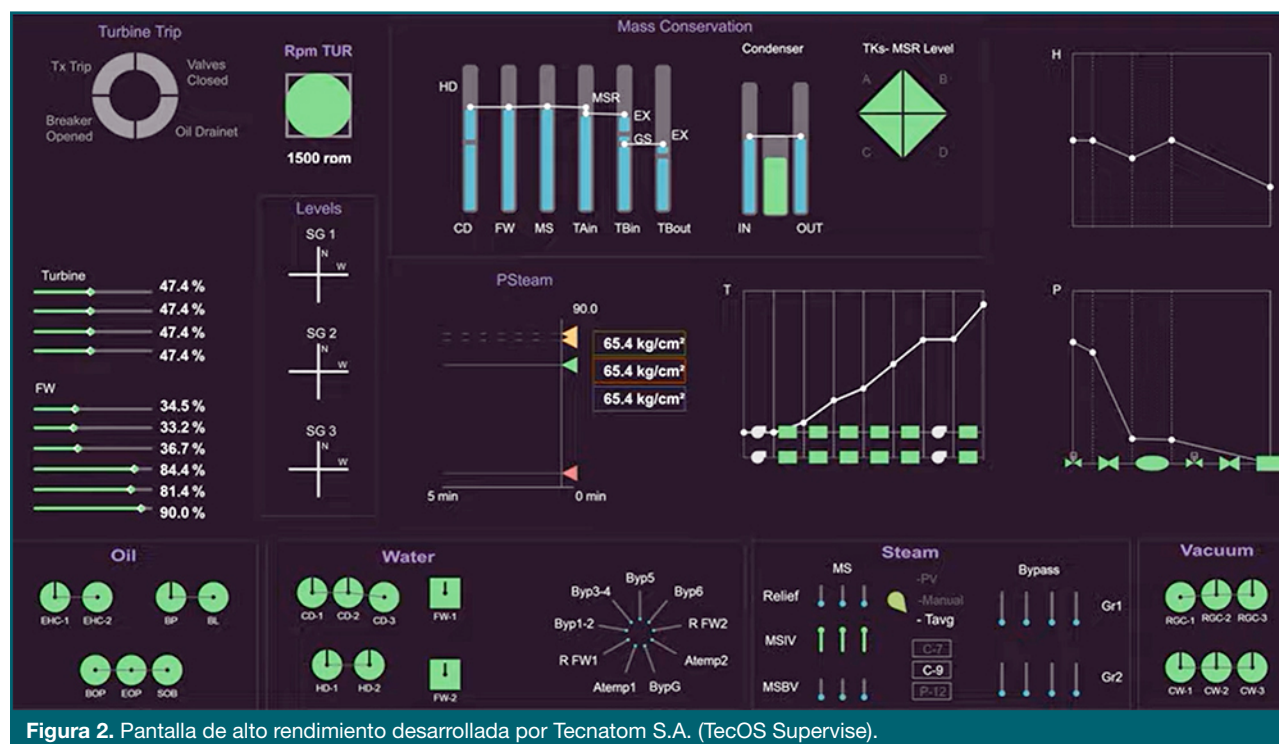


Figura 2. Pantalla de alto rendimiento desarrollada por Tecnomat S.A. (TecOS Supervise).

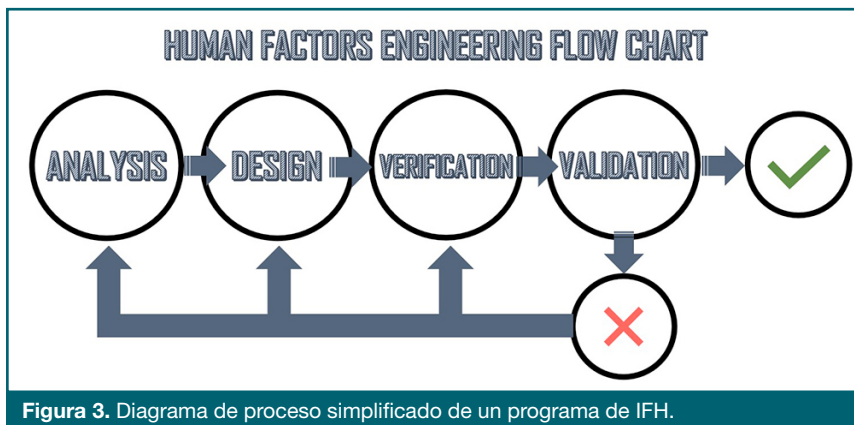


Figura 3. Diagrama de proceso simplificado de un programa de IFH.

- El número de operadores en la sala y sus conocimientos son adecuados para desarrollar las tareas en el tiempo necesario (siendo este el reto más importante del proceso por desviarse de la normativa).
- El diseño de las interfaces contiene todos los elementos para la operación segura de los reactores
- Las conclusiones de los análisis son correctas.
- Los procedimientos de operación y el entrenamiento de los operadores han seguido los mismos criterios y son consistentes con el diseño.

En caso negativo, será necesario volver a los procesos previos afectados e iterarlos hasta llegar al diseño definitivo. Por ejemplo, si en una validación se detecta que es necesario convertir en automática una acción porque eso reduciría el riesgo de error humano, entonces se volverá al análisis de las funciones y su grado de automatización explicado anteriormente, para después modificar otros análisis como el de tareas (Figura 3).

La validación es una representación simulada de los escenarios más exigentes para los operadores. Estos escenarios son elegidos bien por la elevada carga de trabajo, su dificultad, o por contener tareas y acciones importantes que puedan afectar a la seguridad de la planta.

En el caso de los SMR, estos escenarios contendrán situaciones que afecten a varios o a todos los reactores al mismo tiempo, para probar su seguridad y cómo se desenvuelve el operador con los medios que dispone.

Para llevarse a cabo la validación, cada una de las organizaciones inmersas en un proceso de licenciamiento deberán contar con un simulador parcial, uno de alcance total o un gemelo digital de la sala de control del futuro SMR. Además, deberán tener una aproximación a los procedimientos de la planta y de su programa de entrenamiento, que serán usados por los operadores que representen el escenario.

El equipo de ingeniería de factores humanos se encargará de observar y monitorizar las acciones de los operadores en cada momento, tratando de detectar cualquier vacío o

error que pueda llevar a un error, para corregirlo.

Es importante planificar un esquema de validaciones que se adapte a la realidad del proyecto en cada etapa. Es decir, realizar varias validaciones durante la vida del diseño, para que el equipo de operación vaya familiarizándose con el diseño, como para la fabricación modular de las interfaces. Dichas validaciones, si son tempranas, podrán realizarse sobre maquetas o entornos virtuales, como paso previo a la validación final en el simulador de alcance total.

CONCLUSIÓN

Si finalmente el resultado de la validación o de todas las validaciones es positivo, se puede establecer la composición final del personal de la sala de control en base a ello, de este modo queda respaldado y justificado por todo el proceso ordenado de Ingeniería de Factores Humanos realizado.

De este modo, la IFH trata de dar respaldo a los dos retos de los nuevos reactores modulares, operar varios módulos desde una sala con un equipo de operación reducido y que ha sido entrenado en menos tiempo en comparación con una central estándar de gran potencia. Quedando cubierta la parte inicial del licenciamiento del diseño genérico de un SMR.

Más allá de este completo análisis de IFH, queda otro camino por recorrer en la siguiente fase de licenciamiento del reactor: el de la implementación y el diseño final en un emplazamiento, que lleva asociada la revisión de nuevo de las bases establecidas por la IFH en el diseño genérico, tratando cualquier desviación con el diseño específico, en el caso de que se produzca, para poder así ajustarse al mismo número de personal de planta y al diseño de las interfases planteados en la fase anterior.

BIBLIOGRAFÍA

- NRC NUREG-0800, Chapter 18 “Human Factors Engineering”, revision 3.
- NRC NUREG-0711, Human Factors Engineering Program Review Model, revision 3.
- NRC NUREG-0700, Human-System Interface Design Review Guidelines, revision 2.
- IEC 60964, Nuclear power plants - Control Rooms- Design, 2019
- IEC 61839, Nuclear power plants - Design of control rooms - Functional analysis and assignment, 2000
- IEEE 1023, IEEE Guide for the Application of Human Factors Engineering to Systems, Equipment and Facilities of Nuclear Power Generating Stations, 2004
- ISO 11064, Ergonomic design of control centers, 2013.■