

Metodología de análisis de complejidad de Procedimientos de Operación de Emergencia de Centrales Nucleares

P. Martorell, S. Martorell, I. Martón (Univ. Politécnica de Valencia)

F. Pelayo, R. Mendizabal (CSN)

*Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universidad Politécnica de Valencia
pabmaray@etsii.upv.es*

Resumen – Los Procedimientos de Operación de Emergencia (POE) establecen las etapas y contienen las acciones a ejecutar por parte de un operador para dar respuesta a una situación de emergencia. Actualmente se están desarrollando metodologías que permitan evaluar aspectos tales como la complejidad, la completitud y la vulnerabilidad de dichos procedimientos. En la presente ponencia se presenta una metodología para elaborar la red topológica de un POE y un análisis de la misma centrado en la complejidad como atributo fundamental.

1. INTRODUCCIÓN

La experiencia operativa ha demostrado que el error humano es una de las causas principales de numerosos accidentes e incidentes en grandes sistemas con un alto grado de complejidad. Al mismo tiempo, es conocido que el buen diseño de los procedimientos de operación reduce de forma considerable el error humano. Este punto es de especial importancia cuando los operadores se encargan de ejecutar tareas de control en instalaciones y sistemas donde la seguridad supone un aspecto primordial, como es el caso de las centrales nucleares.

Uno de los aspectos más importantes en el momento de elaborar un procedimiento es no presentar una descripción complicada de la tarea. Esto significa que la cantidad de esfuerzo debe ser proporcional a la complejidad de la tarea. Así, el personal de operación necesitará más recursos cognitivos a medida que la tarea que se le presenta sea más complicada, puesto que el proceso estará compuesto de una mayor cantidad de actividades que uno más sencillo. Por lo tanto, es más probable que el personal no ejecute perfectamente la tarea o cometa un error.

Muchas guías se enfocan en aspectos de los procedimientos tales como un diseño claro y un lenguaje conciso. Este es el caso de tareas complicadas formadas por un número cuantioso de expresiones condicionales (*si, y, o, etc.*), que deben ser simplificadas en una o más tareas simples. Con el fin de alcanzar este objetivo, es necesario preguntarse que es una tarea compleja. Para alcanzar este objetivo, se necesitará hallar un método capaz de cuantificar en términos numéricos la complejidad de un procedimiento partiendo del texto escrito del mismo.

Existen en la bibliografía diferentes estudios en los cuales se analiza y cuantifica la complejidad de procedimientos y tareas [1, 4, 5].

En este contexto, la presente ponencia se describirá la elaboración de la red topológica y se aplicará la metodología propuesta por Park [2] para el cálculo de complejidad aplicable a los distintos caminos que pueda adoptar el procedimiento. Además, en este trabajo se propone una modificación de dicha metodología la cual se basa en la ponderación. El caso de aplicación se centra en la aplicación y comparación de la metodología propuesta por Park y la modificación propuesta en esta ponencia al Procedimiento de Operación de

Emergencia (POE) “I/IOF-07 Malfuncionamiento del sistema de evacuación del calor residual”, síntoma de entrada D.1., “Pérdida de una o dos bombas de evacuación de calor residual”[1].

2. DISEÑO

La etapa del diseño del procedimiento comprende todos los puntos que comprenden desde el desarrollo de una red topológica a partir del texto, hasta la extracción de la combinatoria de todas las posibles trayectorias resultantes de la ejecución del POE.


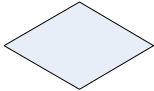

La estructura del procedimiento puede descomponerse jerárquicamente de la siguiente manera, partiendo del nivel más alto, en los siguientes elementos: Trayectoria, Paso, Etapa y Actividad. El POE está estructurado en una serie de pasos. Estos a su vez se descomponen en un nivel inferior denominado etapas, las cuales contienen las actividades últimas que debe realizar el operador de forma secuencial para llevar a cabo el objetivo marcado por el procedimiento.

De esta forma se puede definir una trayectoria como cada una de las posibles sucesiones de etapas que pueden ser ejecutadas por un operador en un POE. El análisis topológico de la red se realizó mediante el programa COLAPSO [3], obteniendo así el listado completo de trayectorias.

La estructura característica de los POE en formato de doble columna, permite realizar una clasificación de los distintos tipos de etapa que podemos encontrar a lo largo del mismo. Esto será interesante en un análisis microscópico del procedimiento, el cual permitirá dilucidar en última instancia los distintos caminos que pueden recorrerse en una misma trayectoria. De esta forma, podremos calcular la complejidad de los mismos, y asociando una probabilidad a la posibilidad de recorrerlos o no, calcular la complejidad total de la trayectoria. Se sigue para ello la clasificación realizada en [4].

Para representar tanto los pasos como las etapas es necesario el uso de una simbología específica para clasificar los distintos elementos que componen la estructura fundamental de cada etapa del procedimiento. Esta simbología se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1. Simbología empleada para diferenciar los distintos elementos que componen la estructura de una etapa de un POE.

Símbolo	Aplicación	Descripción	Ejemplo
	Acción, Chequeo, Monitorización	Demanda una actuación sobre determinado componente o sistema de la central.	<i>Parar la bomba del RHR por malfuncionamiento</i>
	Comprobación, monitorización	Observar la disponibilidad o no de algún componente o sistema de la planta y la realización del seguimiento temporal de alguna variable física	<i>BRR- alguna en funcionamiento</i>
	Indica el número de Paso	Indica el comienzo de un paso o la salida a otro paso o procedimiento	-

Una vez establecido el criterio para representar las actividades que forman cada etapa, el análisis de complejidad del procedimiento se realizará evaluando de forma discreta cada una de las etapas.

3. MÉTODO TACOM

Una vez establecido el criterio para representar las actividades que forman cada etapa, el análisis de complejidad del procedimiento se realizará evaluando de forma discreta cada una de las etapas. Se partirá de la metodología de Park, que permite cuantificar numéricamente los factores de complejidad que integran el POE, dando así un valor de referencia denominado TACOM (*Task Complexity*) [1] para cada una de las etapas del mismo.

Esta medida de complejidad fue validada comparando los valores de TACOM con los tiempos de respuesta recogidos de emergencias simuladas en centrales nucleares. Se observó una fuerte correlación entre los resultados de TACOM y el tiempo de respuesta asociados. A lo largo de este apartado se explicará detalladamente la obtención de TACOM de un procedimiento.

La medida TACOM está definida por una norma euclídea en tres dimensiones de complejidad distintas, sugeridas por Harvey y Koubek [6]:

- Estructura de la tarea (*TR, Task Structurability*): como la secuencia y las relaciones entre subtareas están bien definidas.
- Alcance de la tarea (*TS, Task Scope*): amplitud, extensión, rango o tamaño general de la tarea.
- Incertidumbre de la tarea (*TU, Task Uncertainty*): grado de predicción o confianza asociado a la tarea.

El valor de la complejidad de cada una de estas dimensiones está cuantificado por uno o dos sub-medidas que representan los principales factores que otorgan complejidad a un procedimiento. Estas submedidas son las siguientes

- SIC (*Step Information Complexity*): representa la complejidad debida a la cantidad de información que debe ser procesada por los operadores.
- SLC (*Step Logic Complexity*): representa la complejidad debida a la lógica de ejecución de las acciones que debe realizar el operador
- SSC (*Step Size Complexity*): representa la complejidad debida a la cantidad de acciones requeridas que deben ser llevadas a cabo por el operador.
- AHC (*Abstraction Hierarchy Complexity*): representa la complejidad debida a la cantidad de conocimiento del sistema que es necesaria para identificar el espacio-problema de las operaciones requeridas.
- EDC (*Engineering Decision Complexity*): representa la complejidad debida a la cantidad de fuentes cognitivas que son necesarias para establecer el criterio de decisión adecuado para las operaciones requeridas.

Para cuantificar estas medidas, se deberán emplear una serie de grafos elaborados en cada etapa del procedimiento:

- ACG (grafo de control de la acción): describe las acciones requeridas para cumplir una tarea dada.
- ISG (grafo de estructura de la información): describe los distintos niveles de información requeridos para cumplir una tarea dada.
- AHG (grafo de jerarquía de abstracción): describe los distintos niveles de cognitivos necesarios para emplear un componente, o sistema de la central.
- EDG (grafo de decisiones de ingeniería): describe los distintos niveles de ingeniería de cada una de las acciones tomadas.

Para llevar a cabo la elaboración de estos grafos, se requerirá un análisis exhaustivo de cada acción del procedimiento en los cuatro aspectos correspondientes a cada uno de los grafos.

En primer lugar, para realizar una tarea, es necesario realizar un conjunto de acciones que deben ser identificadas por el operador. Además, también se requiere una serie de información necesaria para que puedan ser cumplidas las acciones requeridas. Después de esto, se determina el nivel cognitivo que deben poseer los operadores para ejecutar cada acción, así como los de decisiones de ingeniería que se asignan a las acciones requeridas.

Una vez se ha concluido este proceso, se realizarán los grafos mencionados. Usando estos grafos, el valor de las cinco submedidas se cuantificará a través del cálculo de entropías de primer y segundo orden de los grafos.

Los cálculos de entropía de primer y segundo orden empleados en la metodología de Park se basan en la definición de Davis y Leblanc [7]. De manera que se pueda cuantificar la entropía de primer orden, las clases de nodos en un grafo deben ser diferenciadas en función de las entradas o inputs (aristas que llegan al nodo) y de las salidas o outputs (aristas que salen del nodo).

$$H_1(G) = - \sum_{i=1}^h p_i \log_2 p_i \quad (1)$$

Donde, A_i es el número de nodos que pertenecen a la clase i -ésima, N es el número total de nodos del grafo G , $p_i = A_i/N$ es la probabilidad estimada de que un nodo pertenezca a la clase i -ésima, h es el número de clases distintas de nodos.

La entropía de segundo orden se calcula siguiendo la Ecuación (1), sin embargo la distinción de nodos por clases se realiza atendiendo a los nodos vecinos separados por una arista

La contribución o peso de cada índice en la medida TACOM se extrajo comparando los valores de estos índices para determinados POEs, y los tiempos de respuesta en simuladores donde se ponían en práctica dichos POEs por parte de los operadores. En la Tabla 2 se recogen los valores de peso.

Tabla 2. Valores de los pesos de las submedidas y dimensiones de complejidad

Designación	Valor
α	0,621
α_1	0,716
α_2	0,284
β	0,239
β_1	0,891
β_2	0,109
γ	0,140

Finalmente se define la medida TACOM en función de las dimensiones de complejidad, y en última instancia de las cinco submedidas esgrimidas.

$$TS = \alpha_1 SIC + \alpha_2 SSC \quad (2)$$

$$TR = \beta_1 SLC + \beta_2 AHC \quad (3)$$

$$TU = EDC \quad (4)$$

$$TACOM = \sqrt{\alpha \cdot TS^2 + \beta \cdot TR^2 + \gamma \cdot TU^2} \quad (5)$$

4. MÉTODO DE LOS PESOS

El método de los pesos se diferencia fundamentalmente respecto al método de Park en tener en cuenta la existencia de múltiples caminos en una misma trayectoria, o lo que es lo mismo, la posibilidad de que el operador no necesariamente tenga que realizar todas las acciones contenidas en cada etapa para recorrer una trayectoria determinada. Por tanto, teniendo en cuenta esta premisa, se puede afirmar en un primer momento que el método de Park está sobredimensionando el valor de la complejidad de la trayectoria.

Veamos como evaluaría el método de los pesos, en primer término, la complejidad de una etapa que tuviese diversos caminos. En esta ponencia se consideran únicamente etapas con dos caminos diferentes.

Los pasos que sigue el método para calcular la complejidad de una etapa son los siguientes:

- Calcular la complejidad de cada uno de los caminos, C_{C1} y C_{C2} , que pueda recorrer la etapa. Se empleará el método de Park para obtener la medida TACOM de cada camino.
- Asignar un peso o probabilidad a cada uno de los caminos, p_1 y p_2 , calculando la complejidad total de la etapa, C_E , de la siguiente manera:

$$C_E = p_1 C_{C1} + p_2 C_{C2} = p_1 C_{C1} + (1 - p_1) C_{C2} \quad (6)$$

5. CASO DE APLICACIÓN

El caso de aplicación se centra en el POE “I/IOF-07 Malfuncionamiento del sistema de evacuación del calor residual”, síntoma de entrada D.1., “Pérdida de una o dos bombas de evacuación de calor residual”.

En este caso, emplearemos la Etapa 13.a que es sobre la que aplicaremos posteriormente el método, aunque este caso de aplicación es extensible a cualquier etapa.

Tabla 3. Extracto del Paso 13 del POE.

13 Comprobar niveles de los GV disponibles:	
a. Nivel de rango estrecho -SUPERIOR AL 29%	a. Establecer caudal de alimentación auxiliar para recuperar el nivel de rango estrecho en al menos uno de los GV superior al 29 %
b. Controlar caudal de agua de alimentación auxiliar para mantener el nivel entre el 29% y el 50%	

La Etapa 13.a puede recorrer dos caminos distintos, que en la Figura 1 están resaltados por los colores rojo y azul.

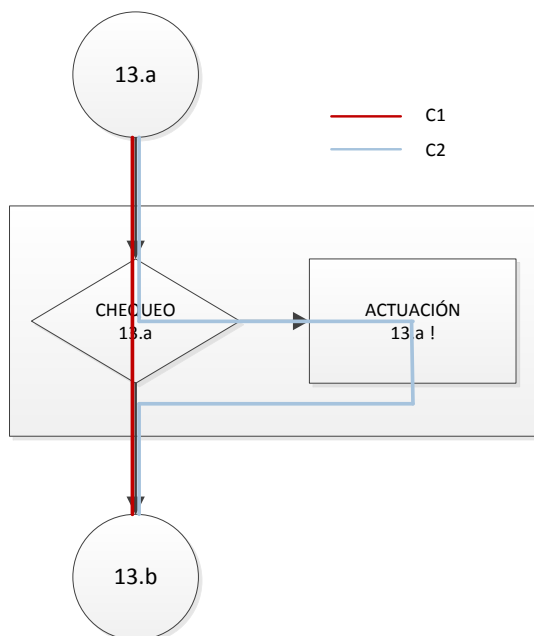


Figura 1. Representación simbólica de la Etapa 13.a

La medida de complejidad TACOM obtenida aplicando la metodología de Park para ambos caminos ofrece los siguientes resultados:

Tabla 4. Valores de TACOM para los caminos C1_{13.a} y C2_{13.a} de la Etapa 13.a.

	C1 _{13.a}	C2 _{13.a}
TACOM	1,710	2,446

La complejidad global de la etapa, se calcularía asociando una probabilidad o peso a cada una de los valores de complejidad halada para los distintos caminos. De esta forma, por ejemplo, asociando una probabilidad de 0,5 a cada una de los caminos, se tiene el siguiente resultado:

Tabla 5. Comparación de la complejidad de una etapa entre el método de los pesos y el método de Park.

C _{13.a} (Pesos) (p ₁ =0,5, p ₂ =0,5)	C _{13.a} (Park)
2,078	2,526

6. CONCLUSIONES

La metodología de Park es una potente herramienta en el estudio pormenorizado de todas las dimensiones de complejidad existentes en un procedimiento de operación de emergencia. Es capaz de valorar de forma numérica la complejidad de aspectos como la cantidad de actividades y el entramado lógica de las mismas, la información requerida, el conocimiento del dominio y el nivel de decisiones de ingeniería necesarios para la ejecución de cada una de las etapas que comprende el procedimiento.

Tomando en consideración una vista global del procedimiento, es capaz de determinar la complejidad entera del mismo. No obstante, existen ciertas debilidades en esta metodología, de las cuales las dos más importantes a considerar son:

- No tener en consideración la posibilidad de adoptar un camino u otro durante la ejecución del procedimiento.
- La existencia de probabilidades asociadas a esos caminos distintos, que determinan la complejidad total del procedimiento. El camino de mayor complejidad, por norma general, no suele ser el más probable.

La metodología propia que se ha aplicado tiene en cuenta la existencia de estos caminos o trayectorias, así como la existencia de probabilidades asociadas a dichos caminos. Sin embargo, su aplicabilidad dependerá principalmente del conocimiento de la probabilidad de adopción de uno u otro camino, en todas aquellas etapas que ofrezcan dos o más bifurcaciones.

El método de Park ofrece un resultado más conservador desde el punto de vista de la cuantificación de la complejidad del procedimiento. Por otro lado, el método de los pesos proporciona una medida más realista sobre la complejidad global del procedimiento.

Estas probabilidades de ocurrencia, al igual que la necesidad de contrastar los resultados obtenidos, a través de datos experimentales de simulaciones realizadas en sala de control, son temas de especial interés y relevancia a tratar a corto y medio plazo. También lo son el estudio de medidas de complejidad alternativas que proporcionen nuevos parámetros sobre vulnerabilidades y completitud del procedimiento.

Aunque el caso de aplicación se haya centrado en una etapa del POE con el objetivo de mostrar la metodología aplicada de forma sencilla, si tuviésemos que aplicar la metodología propuesta a un POE de forma completa se optaría por elaborar el análisis a nivel de etapa, ya que si lo hiciésemos a nivel de actividad tendríamos mucha casuística y supondría una futura pérdida de información durante el análisis de las trayectorias ya que no todas ellas recorren íntegramente todas las etapas de un paso

7. AGRADECIMIENTOS

El trabajo forma parte de un proyecto de investigación financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

8. REFERENCIAS

- [1] Park J., "The Complexity of Proceduralized Tasks". Springer, 2009
- [2] Llombart O. "I/IOF-07 Malfuncionamiento del sistema de evacuación de calor residual". Manual de procedimientos de la dirección de central nuclear de Ascó. Rev 13. 2010.
- [3] Programa COLAPSO, CSN.
- [4] Macwan A., Mosleh A. "A methodology for modeling operator errors of commission in probabilistic risk assessment". Reliability Engineering and System Safety vol.45:139–157, 1994.
- [5] J Park J., Jung W., Ko J. "Investigating the appropriateness of the TACOM measure – application to the complexity of proceduralized tasks for high speed train drivers". Nuclear Engineering and Technology vol 42: 115-124, 2010
- [6] Harvey C. M. and Koubek R. J., "Cognitive, social, and environmental attributes of distributed engineering collaboration: A review and proposed model of collaboration". Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries.vol 10: 369-393,2000.
- [7] Davis J.S. JS, LeBlanc R.J. "A study of the applicability of complexity measures". IEEE Transactions on Software Engineering vol 14(9):1366–1372, 1998