

Análisis del Nivel de Automatismo de Sistemas Robóticos en la Industria Nuclear

Ing. Gastón Orozco Rioja¹, Ing. Ignacio Enrique Catalano², Ing. Celso Alberto Flury³

¹Dpto de Control de Procesos, CAREM 25, Instituto Balseiro, Argentina. Email: gaston.orozco@ib.edu.ar

²Dpto de Control de Procesos, CAREM 25, Instituto Balseiro/CNEA, Argentina. Email: ignacio.catalano@ib.edu.ar

³Dpto de Control de Procesos, CAREM 25, Instituto Balseiro/CNEA, Argentina. Email: celso.flury@ib.edu.ar

Resumen

La aplicación de automatismos en la industria nuclear provee múltiples beneficios, especialmente en el apartado de seguridad. Por lo que es necesario implementar metodologías claras a la hora de evaluar cada actividad y alcanzar un nivel de automatización adecuado que permita un desarrollo óptimo de las funciones de la planta. Es reconocido internacionalmente que esta metodología, en la industria nuclear, está guiada a través del uso de las normas NUREG-0711 [1]. El objetivo principal de estas normas es lograr que la carga de trabajo de los operadores en conjunto a la conciencia de la situación y el trabajo en equipo sean los adecuados para la operación segura del reactor.

Palabras clave: Industria Nuclear - Ingeniería de Factores Humanos - Robótica - Automatización - Reactores modulares pequeños - Asignación de funciones - Carga de trabajo.

Abstract

The application of automation in the nuclear industry provides multiple benefits, especially on behalf of safety. That is the reason why it is important to implement methodologies in order to evaluate each activity, and reach an adequate level of automation to allow an efficient development of the plant functions. An internationally wide known methodology in the nuclear industry is guided through the NUREG-0711 regulations [1]. The main objective of it, is to achieve an optimal balance between the workers task loads, situational awareness and teamwork, with the aim of safe operation of the power plant.

Keywords: Nuclear Industry - Human Factors Engineering - Robotics - Automation - Small modular reactors - Function allocation - Workload.

1. Introducción

El reactor CAREM 25 es un reactor modular pequeño que se implementará por primera vez en una planta de energía prototipo en Argentina. Este posee sus generadores de vapor (GVs) integrados en el recipiente de presión, por lo que la inspección de los tubos de dichos GV's presenta un desafío. Con el fin de reducir la tasa de exposición a la radiación del personal de la planta, se utilizará un sistema robotizado que actualmente se encuentra en diseño que cumpla con dichas funciones de inspección. Este tipo de sistemas robotizados, que pueden encontrarse en la industria general, no han sido utilizados desde la etapa de diseño hasta el momento dentro de la industria nuclear.

1.2 Ingeniería de Factores Humanos

Para este caso de estudio se presenta la aplicación de metodologías pertenecientes a la ingeniería de factores humanos (HFE, por sus siglas en inglés). Esta área de la ingeniería define una base de conocimiento sobre los seres humanos, sus características y limitaciones en relación a sus trabajos, entorno y máquinas. El objetivo primordial es alcanzar un balance óptimo entre la seguridad, eficiencia y satisfacción del operador. Para lograr esto se busca encontrar un método científico conciso y ordenado para la integración de automatismos y seres humanos durante el diseño, y evitar los juicios de intuición, especialmente si los diseñadores no son los que luego trabajarán con ellos. Enfocándonos en nuestro caso de estudio, dentro de la industria nuclear la Comisión de Regulación Nuclear de Estados Unidos (NRC: *Nuclear Regulatory Commission*) tiene un enfoque

“Top-Down” para el área de seguridad nuclear. Se comienza estudiando las funciones principales de la planta y se baja a través del árbol jerárquico de funciones hacia las más simples para alcanzar los objetivos de la planta. Estas últimas son asignadas a entes humanos, automatismos o una combinación de ambos, para luego ser separadas en tareas donde se determinan los elementos necesarios para completarlas satisfactoriamente. Para realizar esto nos basamos en las normas NUREG-0711 [1] y la norma NUREG-3331 [2], donde se presenta la metodología de “Asignación de Funciones” como un proceso para la toma de decisiones durante el diseño y desarrollo de sistemas complejos para lograr una distribución eficiente.

1.3 Verificación y Validación

El proceso de verificación y validación (V&V) determina si el diseño presentado está conforme con los principios propuestos por la HFE para alcanzar los objetivos globales de la planta [9]. Aplicado a nuestro caso de estudio el proceso de V&V es parcial, enfocado a la asignación hipotética de funciones resuelta. Este proceso se ejecuta mediante el uso de métricas objetivas y subjetivas para evaluar la calificación de cada una de las funciones manuales, automáticas o manuales/automáticas. El objetivo de este mecanismo es apoyar en la identificación de errores y desviaciones de los operadores durante las tareas primarias que deben cumplir. Para esto se utilizan parámetros como:

- Tiempo de ejecución.
- Frecuencia de la tarea.
- Precisión de la tarea.
- Cantidad de recursos utilizados.

Para el apartado de medir el desempeño de los operadores se enfocan en tres aspectos: Carga de trabajo, Conciencia de la situación, y Trabajo en equipo. Estas tres áreas se pueden analizar con múltiples métricas siempre y cuando cumplan los requisitos de ser métodos : *No intrusivos, fiables, Válidos, Sensibles y con capacidad de diagnóstico*. Para nuestro caso de estudio, en el marco del Proyecto CAREM 25, se seleccionaron las 3 métricas para cada uno de los aspectos mencionados [4]:

- Carga de trabajo: NASA-TLX
- Conciencia de la situación: SART
- Trabajo en equipo: BARS

El resultado de estos tres apartados indican si la asignación hipotética de funciones que se planteó es acorde a la capacidad de los operadores y muestra

cuales son las funciones que se deben rediseñar, en caso de ser necesario. Además proveen información sobre qué tareas que componen la función son las más críticas para un resultado satisfactorio, cuales son las que mayor demanda de atención poseen, y en aquellas donde el trabajo en equipo sea primordial, permite visualizar qué comportamientos son los adecuados para un desempeño óptimo.

2. Metodología

Desarrollaremos el caso de estudio con el cual ejecutaremos primero la asignación hipotética de funciones (*FA* por sus siglas en inglés), para luego generar un informe de V&V parcial que verifique dicha asignación.

2.1 Caso de Estudio

El reactor CAREM 25 posee 12 GVs, dispuestos de manera radial al núcleo del reactor [Fig. 1]. Este conjunto de GVs posee las siguientes funciones principales :

- **Función principal:** El intercambio de calor para generar vapor.
- **Función principal de seguridad:** Evitar que el agua del circuito primario se filtre al circuito secundario.

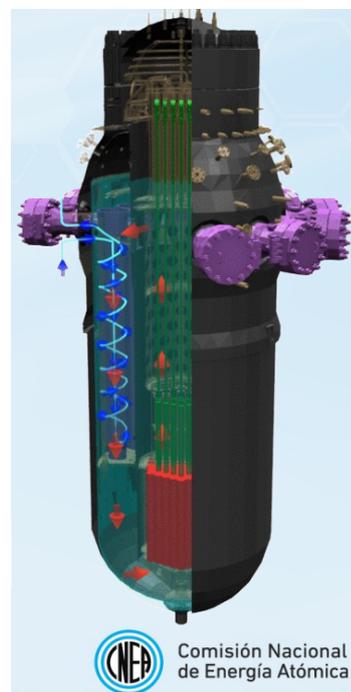


Figura 1. Diagrama de los GVs. Fuente: Área Robótica CAREM 25.

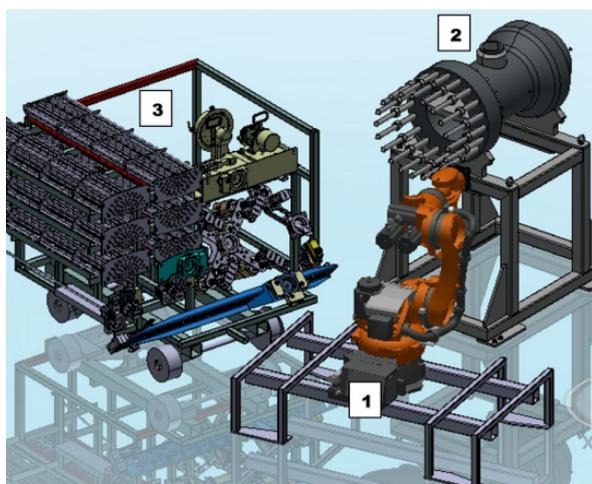


Figura 2. Sistema Automático de Inspección y Mantenimiento (SAIM). Fuente: Área Robótica CAREM 25.

Nuestro caso de estudio involucra el sistema a cargo del mantenimiento de los GVs. Para esta actividad se utiliza un Sistema Automático de Inspección y Mantenimiento (SAIM) encargado de realizar todo el proceso mencionado anteriormente en cada uno de los GVs [Fig 2]. El mismo consta de un brazo robótico (1), acompañado de un rack de herramientas especialmente diseñadas para el Proyecto CAREM 25 (3). En la figura 2, además, se muestra el prototipo de un GV para realizar las pruebas pertinentes (2). Los requisitos funcionales del SAIM son la inspección y mantenimiento los GVs y las soldaduras del interior. Esto consiste en realizar ensayos no destructivos sobre el cuerpo de cada tubo con el fin de conocer su espesor, e inspeccionar los cordones de soldadura de cada tubo y de la brida que conforman los GVs. Para cumplir los requisitos se definieron 5 funciones globales:

- I. Almacenamiento del SAIM;
- II. Posicionamiento en la estación de trabajo;
- III. Acceso a la placa tubo;
- IV. Inspección de tubos y soldaduras;
- V. Mantenimiento de tubos y soldaduras.

El proceso de FA se aplica a las funciones que se desagregan de estas últimas cinco funciones globales. A continuación se explica la metodología en detalle.

2.2 Asignación de funciones

La FA es una actividad realizada dentro de la HFE, y se puede definir como un proceso para tomar decisiones durante el diseño y desarrollo de sistemas complejos, para lograr una distribución eficiente de las funciones que los componen entre los

automatismos y los seres humanos [2]. Este desarrollo de asignación de funciones es un método iterativo que alterna una fase de hipótesis y una fase de evaluación. Esto se aplica al diseño funcional desde el inicio, generando hipótesis relacionadas fuertemente entre tres aspectos principales: ingenieril, humano y de seguridad. Los encargados de este proceso asignan las funciones para cumplir con los requisitos funcionales, teniendo en cuenta la tecnología presente y el costo económico. También es donde se definen los roles del personal, en base a sus capacidades, fortalezas y debilidades para asegurar la seguridad y fiabilidad del diseño [2]. Para avanzar con esta metodología se presentan las definiciones y conceptos que utilizaremos durante el desarrollo de la FA.

2.2.1 Definición de función

En principio podemos definir al término de “función” como las acciones que deben ser realizadas por uno o más sistemas para cumplir los objetivos de la planta. Una función es la capacidad de un subsistema específico para alcanzar un objetivo material o informativo, ya sea intermedio o final. Estas metas operacionales son definidas durante el proceso de diseño de la planta. La función puede ser ejecutada en configuraciones específicas tanto por entidades humanas como máquinas automáticas, o bien un trabajo distribuido entre ellos mediante la interfaz humano-máquina. Las funciones se agrupan en un árbol jerárquico, disminuyendo en complejidad a medida que se van especificando su objetivo [Fig 3]:

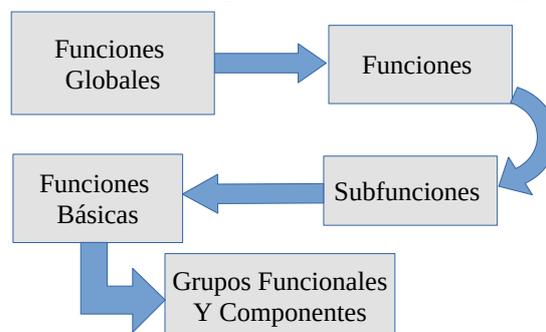


Figura 3. Árbol jerárquico de funciones. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Los niveles de automatismo

Según la ref [8] se definen seis (6) niveles de automatismos para cualquier aplicación partiendo de un nivel “0” donde el trabajo lo realiza completamente el ser humano, utilizando o no herramientas, hasta el nivel “5” donde el humano no tiene injerencia de ningún tipo.

- ➔ **Nivel 0:** El trabajo es realizado 100% por los humanos utilizando máquinas y tecnologías, pero quien toma todas las decisiones son los humanos.
- ➔ **Nivel 1:** Los automatismos ayudan en ciertas ocasiones al operador y entran en acción en tareas simples y repetitivas.
- ➔ **Nivel 2:** El operador se encarga de configurar parámetros, e iniciar la operación. Esta es llevada a cabo por el automatismo sin interrupción a menos que ocurra una excepción al trabajo.
- ➔ **Nivel 3:** El automatismo se encarga totalmente del trabajo bajo un rango de condiciones normales, permitiendo al operador intervenir si es necesario.
- ➔ **Nivel 4:** El automatismo aprende bajo nuevas circunstancias, recopilando y analizando datos para futuras situaciones similares y poder responder satisfactoriamente. El operador también provee información para el sistema. Es capaz de cambiar su comportamiento con el fin de realizar su trabajo de manera más eficiente.
- ➔ **Nivel 5:** El sistema es completamente autónomo capaz de adaptarse a las diversas necesidades de la planta, tanto en condiciones normales como extraordinarias. Todavía no se ha alcanzado este estado en nuestro tiempo presente.

En base a estos niveles de automatización, nuestro caso de estudio se centrará en asignar las funciones del proceso de mantenimiento de los generadores de vapor como “*funciones manuales*”, donde los operadores realizan todas las tareas de la función, correspondientes al nivel 0 de la escala mostrada. El otro extremo sería “*funciones automáticas*”, siendo aquellas ejecutadas por los automatismos de nivel 3, y supervisadas por los operadores. Entre estos dos extremos pueden aparecer múltiples funciones que se clasifican como “*funciones automático/manual*” que representan los niveles 1 y 2 de la escala de automatización.

2.2.3 Matriz de decisión

La asignación de cada función requiere un enfoque a dos variables: El rendimiento humano y el del automatismo. La relación entre estas dos características se ilustra en una matriz de decisión [Fig. 4] que resume en un espacio bidimensional el resultado de la asignación hipotética de funciones [3].

Región “I.a”: Zona donde la automatización no es

técnicamente posible o de costo elevado, o baja eficiencia.

Región “I.m”: La habilidad humana no es capaz de alcanzar los requisitos funcionales.

Región “I.am”: Zona donde los dos casos anteriores se solapan, y cuya única solución radica en redefinir las funciones.

Región “P.a” y “P.m”: Representan la preferencia por la acción automática o manual respectivamente. La selección de cual se escoge en base a experiencias anteriores, carga de trabajo de los operadores, y confiabilidad de los entes disponibles para realizar la función.

Región “P.am”: En esta zona ambas soluciones son factibles. La elección se realiza teniendo en cuenta aspectos ingenieriles, experiencias previas y preferencias de trabajadores.

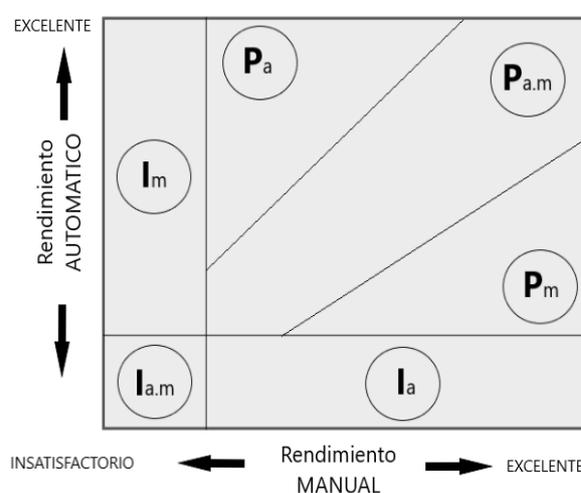


Figura 4. Matriz de decisión. Fuente: Referencia [3].

2.2.4 FA: La etapa Hipotética

La primera fase de la FA es la Asignación Hipotética Inicial de Funciones (AHIF). En esta se desarrollan hipótesis que resuelvan los problemas de diseño, para luego durante la fase de evaluación, comprobar si las primeras suposiciones e hipótesis son adecuadas o requieran correcciones y/o cambios, analizando detalles y costos económicos hasta alcanzar un resultado satisfactorio. [Fig 5]. Mediante una serie de 7 preguntas se determina la clasificación de las funciones. Estas pueden ser ejecutadas principalmente por operadores, denominadas como “Manuales (M)”, o por sistemas automáticos, definidas como “Automáticas (A)”. Aquellas funciones que se ubican entre ambos extremos, son funciones Automática/Manual (A/M).

1. ¿Es obligatorio la automatización?

- 1.1. Las condiciones de trabajo son hostiles para el trabajador
- 1.2. El requerimiento de rapidez de respuesta excede la capacidad humana
- 1.3. Existe un requisito de la autoridad regulatoria
- 1.4. Es una función de seguridad que se requiere que sea automática
- 2. ¿Es técnicamente posible la automatización?
- 2.1. Es el costo económico excesivamente elevado
- 3. ¿Es obligatoria la actuación humana?
- 3.1. Existe un requisito de la autoridad regulatoria.
- 3.2. La automatización es técnicamente

imposible.

- 4. ¿Es posible y razonable la actuación humana?
- 4.1. Se utilizan los parámetros y preguntas del apartado 1.
- 5. ¿Se prefiere la automatización?
- 5.1. Incluso donde la acción humana es capaz de lograr el objetivo, el automatismo se desempeña mejor.
- 5.2. Se identifica el rol del hombre aun para cuya única función sea de monitorear instrumentos y parámetros.
- 6. ¿Se prefiere la actuación humana?
- 6.1. Incluso donde el automatismo es capaz de lograr el objetivo, la acción humana se desempeña mejor y resulta más fiable.
- 6.2. Se identifica el rol del hombre en las tareas manuales, aunque se presenten tareas realizadas por entes automáticos.
- 7. ¿Se necesita algún tipo de soporte automático/manual?
- 7.1. En las funciones definidas como A/M, debe determinarse qué componentes o tareas se deben realizar por las máquinas y humanos para hacer la función eficientemente.

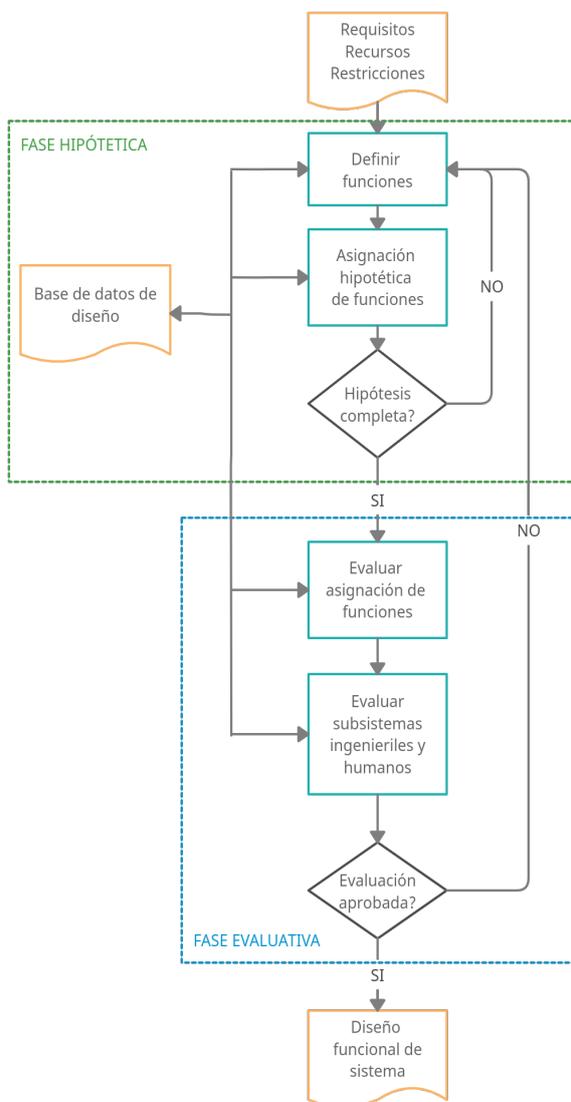


Figura 5. Diagrama de asignación hipotética de funciones. Fuente: Elaboración propia.

2.2.5 FA: La fase Evaluativa

La segunda fase de la FA es la Evaluación de la Asignación Hipotética de Funciones (EAHF) consiste en contestar una serie de preguntas separadas en cuatro pasos que nos darán como resultado final la aprobación o rechazo de nuestra asignación hipotética de funciones. Las 4 fases de preguntas son:

- 1. ¿Cumple el operador con los requisitos de ejecución clave de la función?
En esta prueba el operador es visto como una herramienta ingenieril, que es capaz de recibir información, tomar decisiones y ejecutar tareas de control.
- 2. ¿Cumple el operador con los requisitos de ejecución humanos?
En esta pregunta el ser humano es tratado en su totalidad, considerando tanto su desempeño físico, mental, y social.
- 3. ¿La asignación de funciones compensa económicamente?
Apartado que estudia la relación costo-beneficio de implementar la FA.
- 4. ¿Es adecuado el apoyo cognitivo?
Estudia si es posible mantener el modelo

mental de la planta y de los procesos de los cuales se encarga el operador.

Una vez resueltos estos interrogantes, podemos definir si la asignación hipotética de funciones fue aprobada, o bien rechazada. En este último caso, es necesario redefinir las funciones desaprobadas y nuevamente realizar todo el análisis y evaluación.

2.3 V&V: Desempeño del operador

En nuestro caso de estudio se realiza el proceso de V&V parcial enfocado en la asignación hipotética de funciones resuelta. Esta se ejecuta mediante el uso de métricas subjetivas para el estudio de cada una de las funciones diseñadas que se ubicaron bajo la calificación de funciones manuales, manuales con apoyo automático o automático con apoyo manual. Se estudiarán los 3 aspectos con las métricas seleccionadas en el marco del Proyecto CAREM para la evaluación de estos factores cognitivos [4].

2.3.1 Carga de trabajo: NASA-TLX

El método NASA-TLX es un procedimiento de valoración que da una puntuación global de carga de trabajo, basada en una media ponderada de seis subescalas, que ayudan a definir los factores más relevantes dentro la experiencia de trabajo [5]. Se parte del supuesto que la carga de trabajo es un concepto abstracto subjetivo a la persona que lo realiza, siendo al final el resultado de múltiples características propias del trabajo (duración, ritmo, equipamiento), las circunstancias en las que se realiza (entorno), y las capacidades del operador (experiencia, conocimientos). De las consideraciones mencionadas, se desarrollaron 6 divisiones para alcanzar una métrica de la carga de trabajo [ver tabla 1].

Tabla 1. Divisiones de la carga de trabajo.

Exigencia Mental	¿Cuánta actividad mental y perceptiva es necesaria? ¿Cómo es la tarea, simple, compleja, repetitiva, única?
Exigencia Física	¿Cuánta actividad física requiere la tarea? ¿Es una tarea lenta, rápida, repetitiva, simple?
Exigencia Temporal	¿Cuánta presión de tiempo sintió? ¿El ritmo de la tarea es rápido, o lento?
Esfuerzo	¿Cuánto se ha tenido que esforzar para alcanzar un resultado satisfactorio?
Rendimiento	¿El resultado de la tarea es aceptable? ¿Cuál es su grado de satisfacción?
Frustración	¿En algún momento se sintió inseguro, tenso, preocupado? ¿O lo contrario?

Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de este instrumento se lleva a cabo en dos fases: Fase de Ponderación, previa a realizar la

tarea, y Fase de Puntuación, completada una vez finalizada la actividad.

Fase de ponderación: Se realizan comparaciones binarias (Cuál de las dos es más importante) entre las 6 subescalas de a pares, y se les asigna el peso en función de cuántas veces fueron seleccionadas como más relevantes, cuyos valores varían entre 0 (no relevante), a 5 (la más importante).

Fase de Puntuación: Los operadores evalúan la tarea una vez realizada mediante una representación de 20 intervalos iguales, cuyos extremos son delimitados por adjetivos antónimos (bajo/alto, bueno/malo, poco/mucho). Luego esta puntuación se traduce a una escala de 100 (Puntuación convertida). Finalmente se multiplica el peso con la puntuación convertida y se completa la puntuación ponderada. La media de este último valor indica el valor global de la tarea en estudio.

2.3.2 Conciencia de la información: SART

La métrica SART: “*Situational Awareness Rating Technique*” [6], se basa en 3 aspectos globales que se dividen en 10 variables totales [ver Tabla 2]. La medición subjetiva del operador se realiza una vez finalizada la tarea, dándole un puntaje entre 1 (bajo) a 7 (alto), a una serie de 10 apartados en base a su experiencia propia.

Tabla 2. Aspectos de la métrica SART.

Aspectos	Variables
Demanda de la atención	Inestabilidad de la situación
	Variabilidad de la situación
	Complejidad de la situación
Aporte de la atención	Preparación del operador
	Capacidad mental del operador
	Concentración del operador
	División de la atención
Comprensión	Cantidad de información
	Calidad de información
	Familiaridad de la operación

Fuente: Elaboración propia.

Las variables examinan las características de la relación que existe entre el operador y la tarea a realizar, enfocándose en la atención que demanda la actividad y la capacidad del operador para suplir dicho recurso. Una vez realizadas la tarea y con las variables ya evaluadas por el operador en base a su experiencia, se obtiene un valor de la métrica mediante la fórmula de SART:

$$SA = \text{Comprensión} - (\text{Demanda} - \text{Aporte})$$

El producto final de esta ecuación varía en el rango de [-14, 46]. Un resultado con valor numérico elevado nos indica que el operador posee una buena conciencia de la información durante la ejecución de la tarea y por lo tanto dicha actividad se completa de la manera deseada.

2.3.4 Trabajo en equipo: BARS

Para dar un valor objetivo y medible sobre la calidad del trabajo en equipo de los operadores utilizamos la metodología denominada Behaviorally Anchored Rating Scale (BARS) [7]. Esta se basa en definir un conjunto de comportamientos específicos como ejemplo para calificar el rendimiento deseado del grupo de trabajo a analizar. Para plasmar estas métricas se establecen ejemplos de comportamientos, con valores entre 1 a 5, siendo por ejemplo un comportamiento inaceptable (valor 1) hasta un comportamiento excelente (valor 5). Para estas escalas deben definirse sus grados de manera concreta, enfocadas únicamente en describir los comportamientos, evitando definiciones ambiguas y que tiendan en tener múltiples interpretaciones.

3. Resultados

Para alcanzar un resultado satisfactorio de la FA, en base a las funciones principales, identificamos los requisitos funcionales y con ello determinamos un conjunto de funciones que separamos en cinco grupos [ver tabla 3]. A partir de esto, podemos definir un total de 32 funciones, cuyas asignaciones resultan de la siguiente manera:

- 16 Funciones automáticas (A)

- 7 Funciones manuales (M)
- 9 Funciones automáticas/manual (A/M)

Cabe destacar que las funciones A/M, requieren una inspección visual de un operador que compruebe que los elementos involucrados se encuentren en la posición correcta y que la zona de trabajo esté libre de obstáculos. Por el lado de las funciones automáticas, estas son de carácter simple y repetitivo. En cuanto a las funciones manuales, estas tienen como justificación la necesidad de tomar decisiones en base a datos relevados, y el costo de la automatización es muy elevado.

Se tomaron para mostrar un ejemplo 3 funciones distintas, una de cada tipo: A, M, y A/M. [Ver tabla 4]. En la primera parte se detallan las respuestas de las 7 preguntas de la etapa hipotética. Con estos resultados se determina la clasificación de la función. En la etapa evaluativa de los 4 pasos se confirma si la asignación es satisfactoria o no.

En la segunda parte de la tabla se muestran como se especifican los requerimientos de control, y qué acciones de control son necesarias para el desarrollo de la función. Al finalizar se especifican, bajo "observaciones", qué tipo de soporte es necesario y la justificación de la AHIF.

4. Conclusiones

La metodología propuesta para el proyecto CAREM 25 presenta un camino claro para definir el nivel de automatismos en el sistema de mantenimiento robótico. Frente a la primera asignación hipotética de funciones satisfactoria, la definición de las 32 funciones se encuentra adecuada, siendo posible llevar a cabo su implementación en el diseño. El paso siguiente consiste en contrastar la lista de funciones

Tabla 3. Lista de funciones para la asignación de funciones.

Almacenamiento SAIM	Posicionamiento en la estación de trabajo	Acceso a la placa tubo	Inspección de tubos y soldadura	Mantenimiento de tubos y soldadura
Inicio de Tarea (M)	Acercamiento del SAIM a la posición de trabajo (A/M)	Tomar herramientas del Rack (A)	Seleccionar tubo a inspeccionar (M)	Taponamiento de tubos (A/M)
Comprobar estado general del SAIM (M)	Posicionar SAIM en la zona de trabajo (A/M)	Trabajo sobre los espárragos (A/M)	Acercamiento de la Sonda al tubo (A)	Cambiar sellos de la brida (M)
Comprobar si el camino esta despejado (M)	Anclar SAIM (A)	Trabajo sobre las tuercas (A/M)	Relevo de datos de cada boquilla de tubo (A)	Reemplazo del Reel de SIES (M)
Abrir puerta del recinto de guardado (A/M)	Anclar Rack Herramientas (A)	Retirar Herramientas utilizadas (A)	Relevo de datos de cada cuerpo de tubo (A)	
Iniciar movimiento del SAIM (A)	Desanclar Rack Herramientas (A)	Dejar Herramientas en el Rack (A)	Retirar la sonda de inspección (A)	
	Desanclar SAIM (A)	Posicionar MABRIP frente a la brida (A/M)	Análisis de los datos relevados (M)	
	Retirar SAIM de la zona de trabajo (A)	Anclar MABRIP (A)	Inspección de la soldadura del Plenum (A/M)	
		Retirar Brida ciega con MABRIP (A/M)		
		Desanclar MABRIP (A)		
		Retirar MABRIP de la zona de trabajo (A)		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Ejemplo de aplicación FA.

Función de Sistema	AHIF	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	F1	F2	F3	F4	Evaluación Aprobada	Carga en área central de procesamiento				Total
														Conciencia de la información	Planificación	Decisión	Ejecución	
Acercamiento de la Sonda al tubo	A	Si	Si	No	X	Si	No	X	X	X	Si	X	Si	3	0	0	0	3
Inspección de la soldadura del Plenum	A/M	No	X	No	X	No	Si	5	1	3	1	10						
Cambiar sellos de la brida	M	No	X	Si	Si	No	Si	1	3	1	5	10						

Función de Sistema	AHIF	Requisito de control	Resultado de la asignación hipotética inicial		Observaciones	Justificación de la AHIF
			Acciones de control automáticas	Acciones de control humanas		
Acercamiento de la Sonda al tubo	A	Posición de la sonda	Movimiento de la sonda		Inspección visual del operador	Tarea repetitiva y de difícil acceso para un humano. Controlar dosis de radiación
Inspección de la soldadura del Plenum	A/M	Pos y vel del cabezal de inspección	Movimiento del cabezal de inspección	Inspección visual durante la revisión	SA: Herramienta debe moverse a vel cte y sobre una trayectoria determinada	Automatización para el movimiento y soporte manual para interpretar los datos
Cambiar sellos de la brida	M	Estado de los sellos de la brida		Cambio de sellos de la brida manualmente	SA: asistencia de maquinaria para el cambio	Op crítica para el correcto funcionamiento. Automatización con costo excesivo. Control dosis de radiación

Fuente: Elaboración propia.

con el área de Robótica del Proyecto CAREM 25 para comprobar si es necesario agregar o redefinir alguna función, y de ser así, ejecutar la asignación de funciones para ese caso particular.

Debido a que la verificación y validación de las funciones es el último paso en el diseño, en nuestro caso, el desarrollo de V&V de la FA es de carácter parcial y conlleva la participación de múltiples áreas en el diseño. Por el momento ya se establecieron los métodos para realizar el estudio y es necesario que el proyecto avance para aplicarlos y obtener un resultado tangible en este apartado. En el futuro cercano se dispondrá de equipamiento en el laboratorio del área de Robótica para plantear escenarios de prueba y ejecutar las métricas anteriormente detalladas. Estos métodos pueden establecer los requerimientos necesarios para los puestos de trabajo, y el uso de las métricas mencionadas permite conocer el estado de los operadores durante el desarrollo de la actividad de la planta de potencia.

5. Referencias

- [1] J. M. O'Hara, J. C. Higgins, S. A. Fleger, P. A. Pieringer, "Human Factors Engineering Program Review Model". NUREG-0711 rev. 3, U.S.NRC, November 2012.
- [2]. R. Pulliam, H. E. Price, & J. Bongarra, "A Methodology for Allocation Nuclear Power Plant Control Functions to Human or Automatic Control". NUREG/CR-3331, Nuclear Regulatory Commission, May 1983.
- [3] J. Hugo, D. Gertman, J. Joe, H. Medema, "Development of Technical Basis and Guidance for

Advance SMR Function Allocation". Idaho National Laboratory, September 2013.

[4] Lauren Reinerman-Jones, Svyatoslav Guznov & James Tyson, "Workload, Situation Awareness, and Teamwork". University of Central Florida, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Marzo 2015.

[5] Sandra G. Hart & Lowell E. Staveland, "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research". Vol 52, San Jose State University, 1988.

[6] SKYbrary Aviation Safety, <https://skybrary.aero/articles/situation-awareness-rating-technique-sart>, (2022.05.10)

[7] AHIR Homepage, <https://www.aihr.com/blog/behaviorally-anchored-rating-scale>, (2022.05.10)

[8] Automation Levels, <https://www.linkedin.com/pulse/6-levels-automation-remastered-alex-lyashok>

[9] Human-Factors Engineering – Britannica Online Encyclopedia, Web:

<https://www.britannica.com/print/article/275693>

Web: <https://www.hfes.org/About-HFES/What-is-Human-Factors-and-Ergonomics>