

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL NIVEL DE AUTOMATISMO DE
SISTEMAS ROBÓTICOS EN LA INDUSTRIA NUCLEAR**

Ing. Gastón Orozco
Maestrando

Ing. Celso A. Flury
Director

Ing. Ignacio Catalano
Co-director

Miembros del Jurado

Ing. Fitipaldi, Ana Maria (CNEA)
Ing. Laudari, Andrés (INVAP S.E)
Ing. Maciel Palacio, Felix (Instituto Balseiro)

Diciembre de 2022

Departamento de Control de Procesos, Proyecto CAREM 25. Centro
Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

(Biblioteca Leo Falicov CAB-IB)

Inventario 24646
16/12/2022
Biblioteca Leo Falicov

A mis padres.

Lista de acrónimos

AHIF: Asignación Hipotética Inicial de Funciones.

BARS: Escala de Clasificación de Comportamiento (*Behaviorally Anchored Rating Scale*).

DPC: Dispositivo de Pérdida de Carga.

END: Ensayos No Destructivos.

FA: Asignación de Funciones (*Funtion Allocation*).

GV: Generador de Vapor.

HFE : Ingeniería de Factores Humanos (*Human Factor Engineering*).

HMI: Interfaz Humano Máquina (*Human-Machine Interface*).

MABRIP: Máquina de Apertura de Brida Plenum.

NASA-TLX: Índice de la Carga de Trabajo de la NASA (*NASA - Task Load Index*).

NRC: Comisión de Regulación Nuclear de Estados Unidos (*Nuclear Regulatory Commission*).

RACK: Contenedor de herramientas.

SA: Soporte automático.

SM: Soporte manual.

SAIM: Sistema Automático de Inspección y Mantenimiento.

SART: Técnica de Calificación de la Consciencia de la Situación (*Situational Awareness Rating Technique*).

SIES: Sistema de Impulsión y Extracción de Sonda de inspección.

V&V: Verificación y Validación.

Índice de contenidos

Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
1. Introducción	1
1.1. Caso de estudio	2
2. Marco Teórico	5
2.1. Ingeniería de factores humanos	5
2.2. Asignación de funciones	6
2.3. Los niveles de automatismos	9
2.4. El modelo de dos variables: Matriz de decisión	10
2.5. Validación y Verificación	12
2.5.1. Carga de Trabajo: NASA-TLX	14
2.5.2. Consciencia de la Situación: Método SART	15
2.5.3. Trabajo en Equipo: BARS	16
3. Metodología	17
3.1. Metodología de la asignación de funciones	17
3.1.1. La Fase Hipotética	17
3.1.2. La Fase Evaluativa	21
3.1.3. Acciones de control y Carga de trabajo	22
3.2. Metodología de V&V	24
3.2.1. Aplicación de la métrica NASA-TLX	25
3.2.2. Aplicación de la métrica SART	27
3.2.3. Aplicación de la métrica BARS	28
4. Resultados	31
4.1. Primeros Resultados de la FA	31
4.2. Resultados Finales de la FA	33

4.3. Resultados de V&V	36
4.3.1. Resultado de la métrica NASA-TLX	37
4.3.2. Resultado de la métrica SART	38
4.3.3. Resultado de la métrica BARS	38
5. Conclusiones	41
A. Tablas	45
Bibliografía	53

Índice de figuras

1.1. Vista en corte del reactor modular.	2
1.2. Disposición del SAIM y maqueta de GV.	3
1.3. Diagrama de Funciones Globales.	4
2.1. Niveles de automatismos.	9
2.2. Matriz de decisión: Rendimiento Automático/Manual	11
2.3. Diagrama del Rol de V&V	12
3.1. Diagrama de la metodología de la Asignación de Funciones.	18
3.2. Diagrama de Flujo de las Preguntas en la AHIF.	20
3.3. Diagrama de Flujo de la Fase Evaluativa.	22
4.1. Distribución Inicial de las Funciones.	31
4.2. Distribución Final de Funciones.	33

Índice de tablas

2.1. Los 6 aspectos de la métrica NASA-TLX.	14
2.2. Aspectos de la métrica SART.	15
3.1. Descripción de las áreas centrales de procesamiento.	23
3.2. Ejemplo de comparación de las subescalas.	25
3.3. Ejemplo de la métrica NASA-TLX.	26
3.4. Ejemplo de la métrica SART.	27
3.5. Tabla de ejemplos de comportamiento.	28
3.6. Ejemplo de aplicación de BARS.	29
4.1. Lista Inicial de Funciones.	32
4.2. Lista Final de Funciones.	34
4.3. Ejemplo de FA: Fase Hipotética y Fase Evaluativa.	34
4.4. Ejemplo de FA: Acciones y Requisitos de Control.	35
4.5. Tabla de comparaciones binarias.	37
4.6. Distribución de los pesos de las variables.	37
A.1. Lista de funciones en secuencia.	46
A.2. Asignación Hipotética Inicial de Funciones - Parte 1.	47
A.3. Asignación Hipotética Inicial de Funciones - Parte 2.	48
A.4. Tabla de Fase Evaluativa.	49
A.5. Tabla de Acciones y Requisitos de control y la Carga de Trabajo.	50
A.6. V&V: Tabla NASA-TLX para las funciones manuales.	51
A.7. V&V: Tabla SART para las funciones manuales.	52

Capítulo 1

Introducción

La aplicación de automatismos en la industria nuclear provee múltiples beneficios, especialmente en el apartado de seguridad, especialmente luego de los estudios realizados en el accidente nuclear conocido como *Three Mile Island* [1]. 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 desarrollada a través del uso de la guía NUREG-0711 [2]. El objetivo principal de estas normas es lograr que la carga de trabajo de los operadores en conjunto a la consciencia de la situación y el trabajo en equipo sean los adecuados para la operación segura del reactor.

Para alcanzar este objetivo es necesario preguntarse cuales de las funciones de la planta serán realizadas por humanos, cuales serán ejecutadas por automatismos, y cuales por interacción combinada de ambos entes [3]. Esto no solo involucra la definición de las funciones necesarias para alcanzar los objetivos globales, sino que además deben cumplirse los requisitos funcionales y determinar los componentes y parámetros necesarios para el control remoto de los grupos funcionales encargados de cada función y tarea.

Una vez establecida la asignación de funciones a quienes corresponda, es necesario verificar y validar este diseño. Esto se realiza mediante un análisis de las funciones de manera individual durante el proceso de diseño, y luego se ejecuta este estudio de manera global e integral. Para esto se utilizan diversas métricas capaces de medir el desempeño de los encargados de realizar las funciones de manera objetiva, incorporando tanto el aspecto técnico como el humano de los operadores [2].

1.1. Caso de estudio

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. Según los primeros estudios de tiempos de trabajo, se estima que el procedimiento de mantenimiento dura aproximadamente diecisiete (17) horas por GV. Por lo que es necesario idear nuevas formas de trabajo con el fin de **reducir la exposición a la radiación del personal de la planta**. Para esto 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.

El reactor CAREM 25 posee doce (12) GV's, dispuestos de manera radial al núcleo del reactor (ver figura 1.1). Este conjunto de GV's posee las siguientes funciones principales:

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

Nuestro caso de estudio involucra el sistema a cargo de la inspección preventiva y mantenimiento de los GV's. Para esta actividad se utiliza un Sistema Automático de Inspección y Mantenimiento (SAIM) encargado de realizar el proceso mencionado anteriormente en cada uno de los GV's (ver figura 1.2). 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 1.2, además, se muestra el prototipo de un

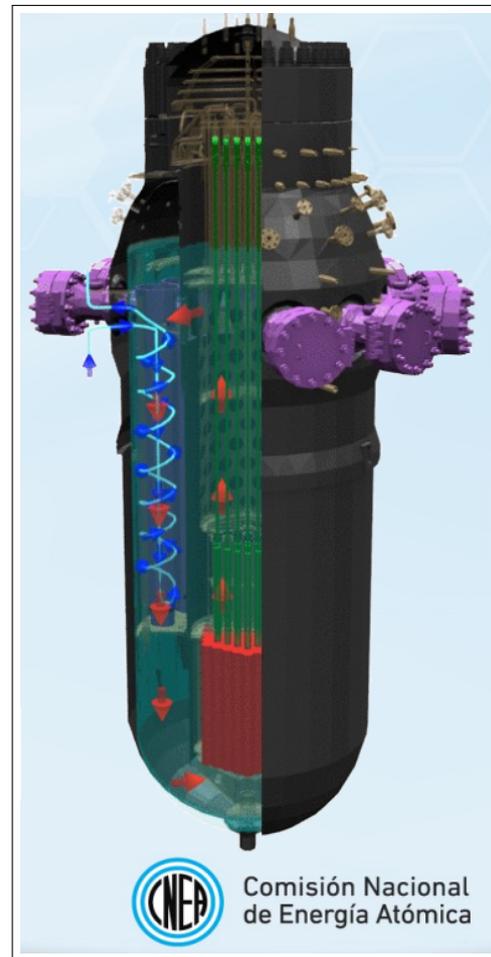


Figura 1.1: Vista en corte del reactor modular.

plenum de GV para realizar las pruebas pertinentes (2). Los requisitos funcionales del SAIM son la inspección y mantenimiento de los GVs y las soldaduras del interior de los plenum [4]. Esto consiste en realizar ensayos no destructivos sobre el cuerpo de cada tubo con el fin de reconocer indicaciones de posibles fallas futuras, e inspeccionar los cordones de soldadura de los plenum y de la brida que conforman los GVs.

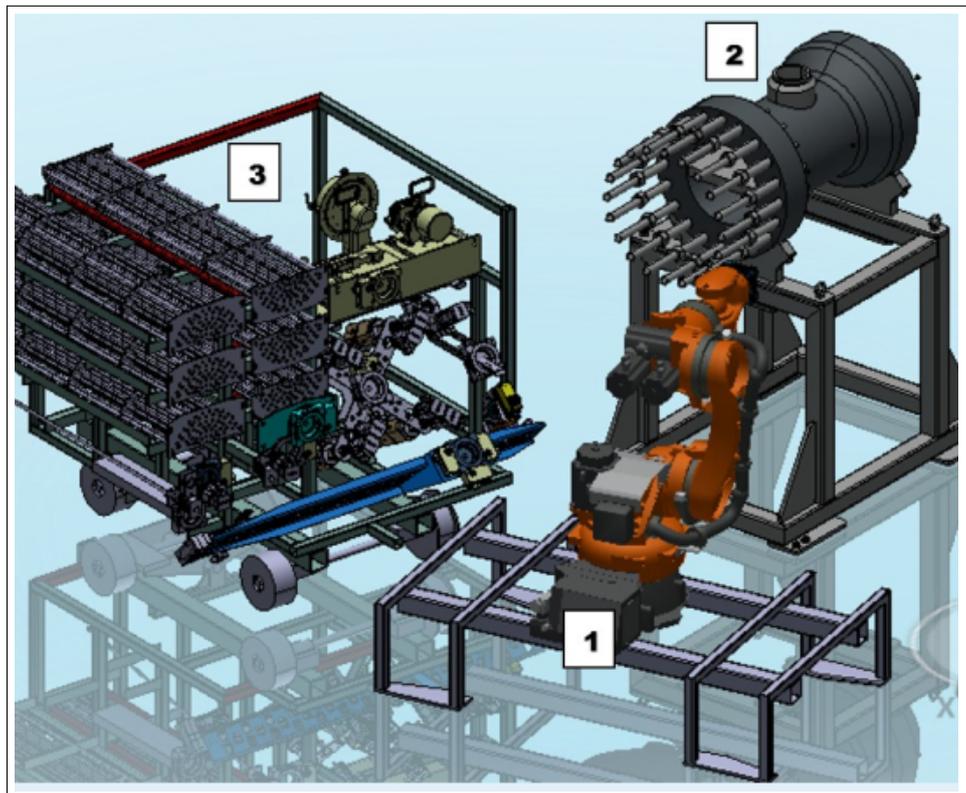


Figura 1.2: Disposición del SAIM y maqueta de GV.

Para cumplir los requisitos se definieron cinco (5) funciones globales [5]:

1. Almacenamiento del SAIM;
2. Posicionamiento en la estación de trabajo;
3. Acceso a la placa tubo;
4. Inspección de tubos y soldadura;
5. Mantenimiento de tubos y soldaduras.

Cabe destacar que la primera función global “*Almacenamiento del SAIM*”, y el conjunto de funciones que se incluyen bajo ésta, se realizarán una vez durante todo el proceso de mantenimiento de los GVs, por lo que están contempladas fuera del ciclo de trabajo sobre los GVs. El siguiente gráfico (ver figura 1.3) muestra de manera general

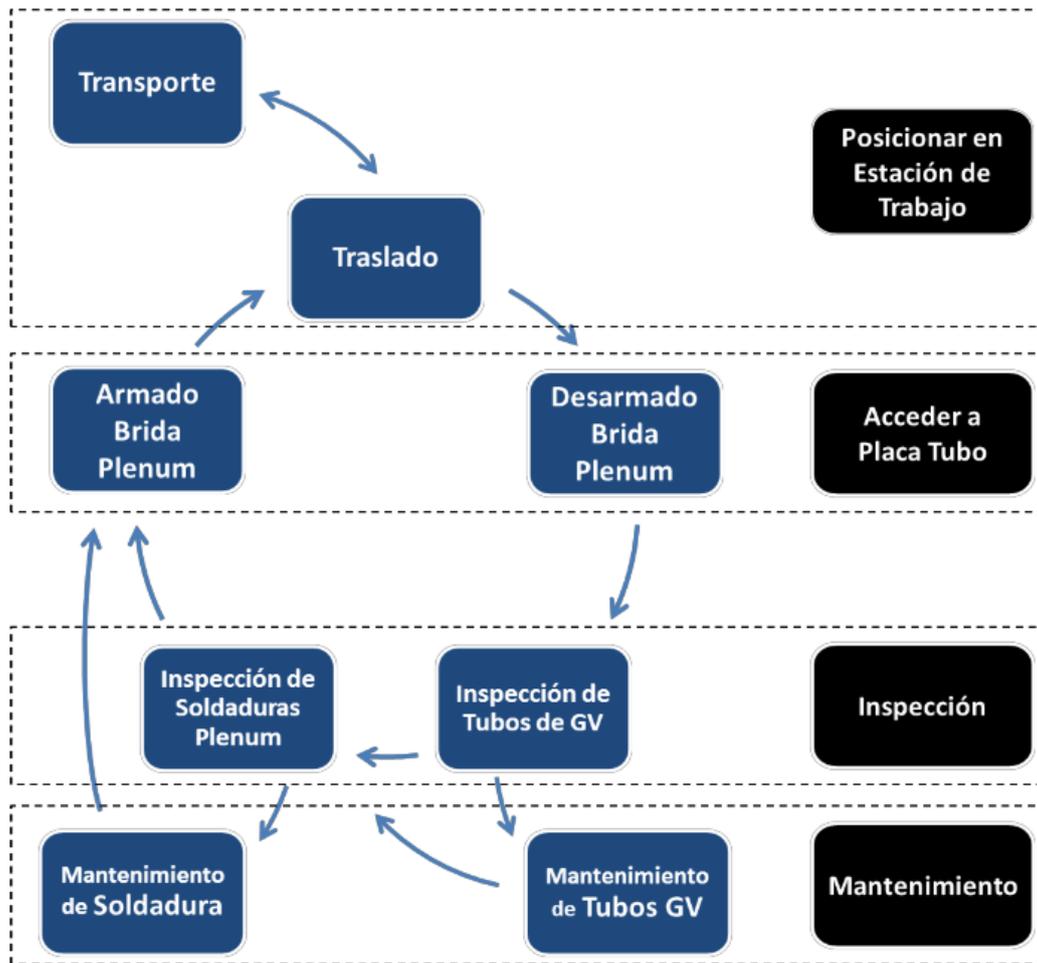


Figura 1.3: Diagrama de Funciones Globales.

qué contiene cada función global, y cómo es el ciclo simplificado de la actividad de inspección y mantenimiento de los GVs.

Con el fin de obtener un resultado satisfactorio de los objetivos globales se diseñaron funciones que cumplen con los requisitos funcionales, las cuales se analizarán para determinar cual es el nivel de automatismo adecuado y luego se realizará una verificación y validación parcial de las funciones diseñadas.

A continuación se plantea el marco teórico (capítulo [2.Marco Teórico](#)) utilizado para el trabajo, luego la metodología empleada para el estudio (capítulo [3.Metodología](#)), siguiendo se presenta el procesamiento de nuestro caso de estudio (capítulo [4.Resultados](#)), y finalmente un apartado donde establecemos las conclusiones de los resultados mostrados (capítulo [5.Conclusiones](#)).

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo presentaremos la teoría y fundamentos de la Ingeniería de Factores Humanos aplicados a la industria nuclear, explicaremos el proceso de Asignaciones de Funciones, el concepto de nivel de automatismo y como se definen cada uno de ellos. Además exponemos el proceso de Verificación y Validación, explicando su importancia en el diseño de las plantas nucleares de potencia y las métricas que evalúan el desempeño de los operadores.

Todo esto es la base teórica para aplicar las metodologías de análisis del nivel de automatismo de sistemas robóticos en nuestro caso de estudio y alcanzar un resultado satisfactorio.

2.1. Ingeniería de factores humanos

El término “Ingeniería de factores humanos” (o por sus siglas en inglés HFE: *Human Factors Engineering*) [6], [7], se utiliza para definir una base de conocimientos sobre los seres humanos, sus características y limitaciones en relación a sus trabajos, entorno y máquinas. Esto incluye el estudio y análisis de esta información para involucrarla en el diseño de sistemas de producción y maquinarias, metodologías de trabajo, e interfaces humano-máquina, con el fin de lograr un balance óptimo entre la seguridad, la eficiencia y la satisfacción del operador. Este tipo de ingeniería involucra profesionales en un rango muy amplio de especialidades, desde ingeniería industrial y medicina, hasta psicología y sociología. Su principal objetivo es: *optimizar el trabajo en pos de la salud y seguridad del operador*.

Sin importar en qué ambiente se enfoque la ingeniería de factores humanos, existen dos premisas primordiales:

- La primera radica en encontrar un método científico conciso y ordenado para la integración humano-automatismo, y evitar cualquier juicio de intuición o sentido

común, especialmente si los encargados de diseñar dichos sistemas, no son los que luego trabajarán con ellos.

- La segunda es que a pesar de aplicar una metodología científica, es inherente arribar a una metodología de diseño por prueba y error. Cada iteración de diseño puede traer nuevos problemas, los cuales necesitan nuevas soluciones. Es decir, que aunque el objetivo de la ingeniería de factores humanos es encontrar métodos científicos que reemplacen a la intuición y sentido común en el diseño global de un sistema, la forma práctica de aplicarlo tiende a ser más con enfoque empírico que teórico.

Las aplicaciones de la HFE son utilizadas en el diseño de herramientas y sistemas, que incluyen elementos simples como el diseño de carteles de tránsito y utensilios de cocina, hasta sofisticadas industrias como el diseño y desarrollo de hospitales y plantas nucleares de potencia.

Focalizando en la industria nuclear, la Comisión de Regulación Nuclear de Estados Unidos (NRC: *Nuclear Regulatory Commission*) [2] tiene un enfoque HFE de “Top-Down” para el área de seguridad nuclear. Este proceso comienza estudiando las funciones conceptuales principales de la planta, y baja a través del árbol jerárquico de funciones, hacia aquellas más simples necesarias para alcanzar los objetivos de la planta. Las funciones asignadas a humanos son separadas en tareas, y éstas a su vez son analizadas para determinar qué tipo de alarmas, pantallas, controles y soporte es necesario para realizar correctamente la tarea, y son evaluadas para verificar si la carga de trabajo es aceptable. Por el lado de las funciones asignadas a entes automáticos, se estudia la factibilidad técnica y económica de aplicar tecnologías existentes para alcanzar resultados satisfactorios de estas funciones.

La validación y verificación de las funciones realizada por los especialistas de HFE es amplia y tiene en cuenta las operaciones de planta normales y anormales, así como las situaciones de emergencia, los procedimientos de mantenimiento, inspecciones, pruebas y vigilancia. Esto incluye el diseño de la interfaz humano-máquina, el diseño de los procedimientos y entrenamiento del personal. Este proceso de V&V busca que las funciones diseñadas cumplan con los requisitos técnicos y que la función analizada en cuestión cumpla en la práctica su cometido de manera satisfactoria.

2.2. Asignación de funciones

La asignación de funciones (por sus siglas en inglés FA: *Function Allocation*) 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 lo componen entre los automatismos y los seres humanos [3],[8].

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 encuentran dentro de un árbol jerárquico según la especificidad de su diseño. Las “*Subfunciones*” representan las acciones que debe realizar el proceso para alcanzar el objetivo de las funciones de mayor rango. Estas se pueden ir desagregando en funciones cada vez más específicas que al final se reducen hasta su mínima expresión denominada “*Funciones de Sistemas*” que son llevadas a cabo por los grupos funcionales, y éstos a su vez constituidos por componentes.

Objetivos Globales → *Funciones* → *Subfunciones* → *Funciones Básicas*
→ *Funciones de Sistema* → *Grupos Funcionales* → *Componentes*

El proceso de asignación de funciones se realiza teniendo en cuenta tanto el aspecto ingenieril como el humano para alcanzar una solución. 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.

El procedimiento consiste en responder una serie de preguntas, cuyas respuestas son utilizadas para obtener una primera aproximación a la FA, aplicando los siguientes criterios generales:

1. **Análisis de expertos:** Debe analizarse desde el punto de vista de la ingeniería de factores humanos como también desde el aspecto técnico, la información obtenida por la actividad de plantas análogas, predicciones ingenieriles, estudios de costos y datos provenientes de HFE.
2. **Equipo Multidisciplinario:** Se recomienda que la FA sea realizada por un grupo de agentes especialistas en diversas áreas, con un experto encargado como coordinador, quien no pertenece a ningún equipo de especialistas.

3. **Tecnología Similar:** Se recomienda la comparación de sistemas y componentes tecnológicos en plantas similares.
4. **Base de datos de diseño:** Se recomienda utilizar los datos obtenidos durante otros proyectos y además registrar los datos actuales para futuras inspecciones.
5. **Simplicidad y rapidez:** No se requiere que las funciones sean asignadas en un único análisis, sino que se pueden volver a estudiar y generar nuevas hipótesis. Sin embargo se debe, en primera instancia, realizar una aproximación con criterio.
6. **Criterio permisivo:** La idea de la FA es ubicar las funciones en su lugar óptimo, sin embargo cuando se estudia el sistema en su conjunto, muchas de estas asignaciones no caerán en el lugar óptimo, por lo que deben aceptarse y continuar con el estudio.
7. **Análisis de las funciones en serie:** En un principio debe estudiarse cada función por separado, y una vez alcanzada una respuesta satisfactoria, el estudio se amplía a todas las funciones actuando en conjunto.
8. **Matriz de decisión:** Se utiliza la matriz Automático-Manual (ver figura 2.2) para asignar algunas funciones con características determinadas que requieren un estudio de las capacidades humanas y tecnológicas.
9. **Procedimiento de decisión:** Se debe plantear por el coordinador un orden para analizar las funciones. Luego se describen las hipótesis desde el punto de vista ingenieril, y se discuten los efectos sobre el personal por los expertos de HFE. El encargado decide una asignación hipotética, y luego comienza su fase de prueba.

Junto a los criterios mencionados anteriormente, se reúne toda la información necesaria para que las funciones logren alcanzar los objetivos de la planta:

- Los requisitos lógicos para su implementación.
- Las acciones de control necesarias para ejecutar las funciones.
- Las variables necesarias para las acciones de control.
- Los criterios para evaluar el resultado de las acciones de control.
- Las variables necesarias para la evaluación.
- Los criterios para elegir alternativas.

Las bases técnicas de la asignación de funciones pueden ser cualquier combinación de los siguientes casos:

- ◆ En base a sistemas en funcionamiento anteriores y las experiencias recolectadas de estos.
- ◆ Personal capacitado cuando el conocimiento y juicio humano es necesario para el correcto desarrollo de las funciones.
- ◆ Automatismos cuando la necesidad de operación excede las capacidades humanas y la probabilidad del error humano es muy alta.
- ◆ Responsabilidad del personal de monitorear funciones automáticas, detectar errores y ser capaces de tomar el control en caso de ser necesario.

2.3. Los niveles de automatismos

Existen 6 niveles distintos de automatización definidos de manera global 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 [9]. A continuación, se explican los distintos niveles. (Ver figura 2.1).

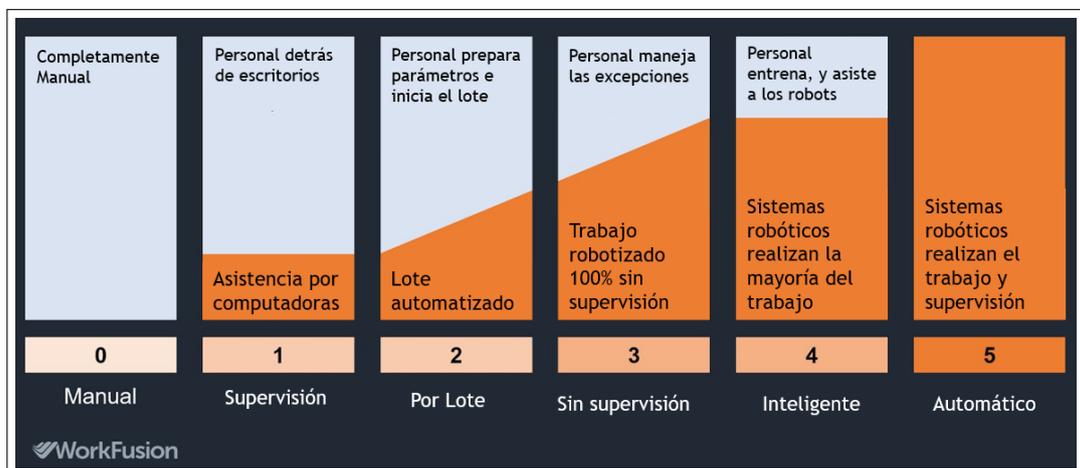


Figura 2.1: Niveles de automatismos.

- **Nivel 0:** El trabajo es realizado 100% por los humanos utilizando máquinas y tecnologías, pero quien toma todas las decisiones son los humanos. Ejemplo: Utilizar un vehículo considerando carga de combustible, manejo en la ciudad y mantenimiento del motor.
- **Nivel 1:** Los automatismos ayudan en ocasiones al operador y entran en acción en tareas simples y repetitivas. Ejemplo: el control crucero en el vehículo.

- **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 bajo la supervisión del ser humano. Ejemplo: Sistema de estacionamiento automático.
- **Nivel 3:** El automatismo se encarga totalmente del trabajo bajo un rango de condiciones normales, permitiendo al operador intervenir si es necesario. Ejemplo: Piloto automático en autopistas.
- **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. Ejemplo: Manejo autónomo del vehículo en toda situación, y el conductor se convierte en pasajero durante el uso del vehículo.
- **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 cero (0) de la escala mostrada. El otro extremo sería “*funciones automáticas*”, siendo aquellas ejecutadas por automatismos de nivel tres (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 uno (1) y dos (2) de la escala de automatización.

2.4. El modelo de dos variables: Matriz de decisión

La asignación de cada función requiere un enfoque a dos variables: **El rendimiento humano y el de la máquina**. La relación entre estas dos características se ilustra en una matriz de decisión (ver figura 2.2) que resume en un espacio bidimensional el resultado de la asignación hipotética de funciones [3],[10].

- **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, es decir que el humano es físicamente incapaz de realizar la función.

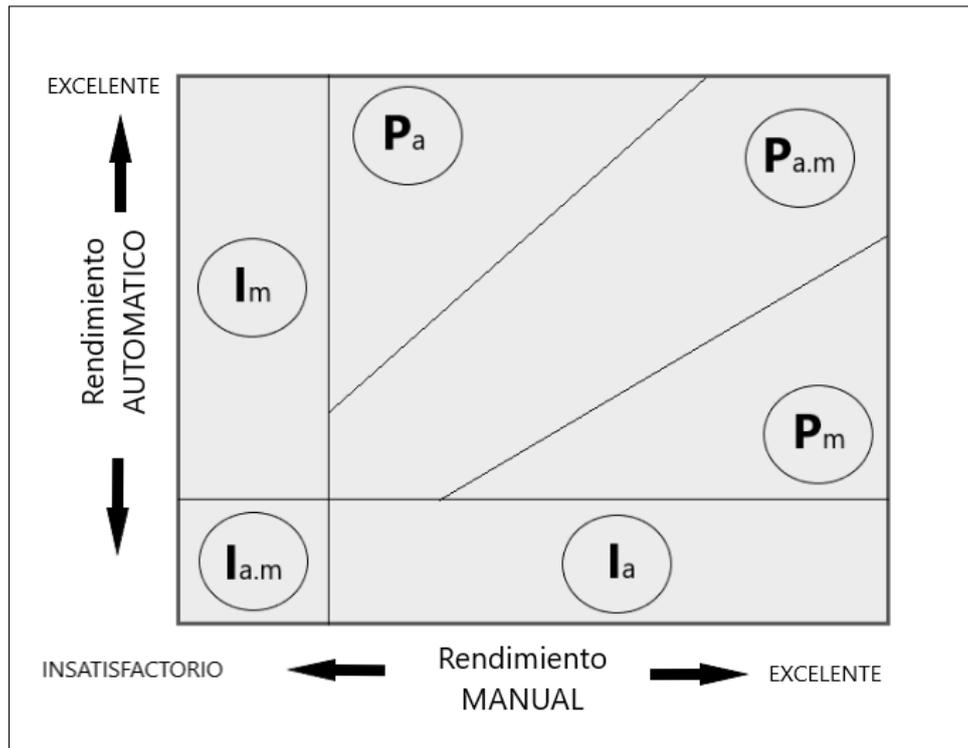


Figura 2.2: Matriz de decisión: Rendimiento Automático/Manual

- **Región $I_{a.m}$:** 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 es en base a experiencias anteriores, carga de trabajo de los operadores, y confiabilidad de los entes disponibles para realizar la función.
- **Región $P_{a.m}$:** En esta zona ambas soluciones son factibles. La elección se realiza teniendo en cuenta aspectos ingenieriles, experiencias previas y preferencias de trabajadores.

Esta escala bidimensional no posee valores numéricos ya que resulta prácticamente imposible calificar numéricamente tanto a la efectividad humana y de la máquina bajo un mismo criterio, sino que la matriz de decisión ayuda a definir en una primera instancia que tipo de asignación es preferida frente a cada función. Luego de este acercamiento, se llega al resultado final mediante la FA (ver capítulo 3.1).

2.5. Validación y Verificación

El desempeño de los trabajos complejos exige un estado elevado de atención y de concentración, es decir de estar alerta y pendiente de un conjunto de actividades durante un periodo de tiempo. Para tratar con esto se recurre a la integración de la automatización a las actividades, sin embargo, un exceso de la misma es capaz de excluir al ser humano, despojándolo de información relevante y capacidad de intervención al intentar disminuir la carga de trabajo, pero al final dan lugar a exigencias cognitivas más elevadas obteniendo un resultado opuesto a lo buscado.

La validación y verificación (V&V) determinan si el diseño presentado está conforme con los principios propuestos por la ingeniería de factores humanos, para asegurar los objetivos globales de la planta. Dentro de la HFE, estos términos de V&V se pueden definir de la siguiente manera [11] (ver figura 2.3):

- **Verificación:** Proceso para determinar si la instrumentación y equipamiento cumple con los requisitos funcionales de la función al ser realizada por los operadores. En este contexto, es una serie de pruebas analíticas de la instrumentación, de sistemas de control, pantallas, y demás equipamiento que evalúan si estos son capaces de completar la función correctamente según los requisitos técnicos, operativos, y humanos planteados.
- **Validación:** Proceso para determinar si el diseño de los automatismos y la organización del personal es adecuada para alcanzar el objetivo propuesto por la función en el diseño de manera satisfactoria. Consiste en determinar si la función final, en la practica, es capaz de cumplir su objetivo de manera concreta y acorde a lo esperado.

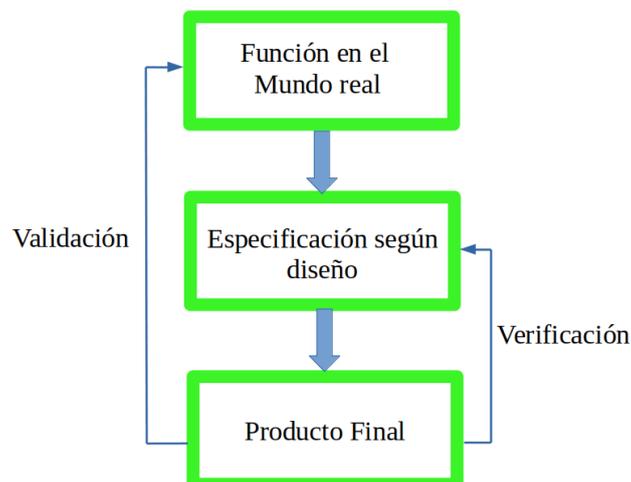


Figura 2.3: Diagrama del Rol de V&V

En nuestro caso de estudio se realiza el proceso de V&V parcial enfocado en la asignación hipotética inicial de funciones evaluada. Esta se ejecuta mediante el uso de métricas objetivas y 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. Estas funciones se desagregan hasta su expresión básica, y determinamos las tareas que se deben llevar a cabo para cumplir el objetivo de esa función [12].

Las métricas objetivas son utilizadas para apoyar en la identificación de errores por omisión, o bien cualquier acción que desvíe a los operadores de las tareas primarias que deben cumplir (errores por comisión). Estas características se relevan durante la ejecución de las tareas por el equipo de observadores tomando en cuenta, por ejemplo, los siguientes parámetros:

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

Para conocer la performance de los operadores de manera subjetiva se estudiarán 3 aspectos: *Carga de trabajo*, *Consciencia de la situación* y *Trabajo en equipo*. Se estudiarán los tres (3) aspectos anteriores con las métricas seleccionadas en el marco del Proyecto CAREM 25 para la evaluación de estos factores cognitivos. Ellas son las siguientes:

- ★ Carga de Trabajo: NASA-TLX
- ★ Consciencia de la Situación: SART
- ★ Trabajo en Equipo: BARS

Estas metodologías de medición de parámetros subjetivos del comportamiento humano deben cumplir los requisitos de:

- No Intrusivo;
- Fiable;
- Válido;
- Sensible y Ser de diagnóstico.

A continuación se describen en detalle cada una de las métricas a utilizar para conocer la performance del operador en las funciones asignadas como “Manuales”, ya que son las que analizaremos en nuestro caso de estudio.

2.5.1. Carga de Trabajo: NASA-TLX

El método NASA-TLX (por sus siglas en inglés *Nasa Task Load Index*) 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 de la experiencia de trabajo [13]. 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 seis (6) divisiones para alcanzar una métrica de la carga de trabajo [14]. Para facilitar la interpretación de éstas categorías, se generan una serie de preguntas (ver Tabla 2.1).

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

Tabla 2.1: Los 6 aspectos de la métrica NASA-TLX.

La aplicación de este instrumento se lleva a cabo en dos fases: la *Fase de Ponderación*, previa a realizar la tarea, y la *Fase de Puntuación*, que se completa una vez finalizada la actividad.

- ★ **Fase de ponderación:** Se realizan comparaciones binarias (Cuál de las dos es más importante) entre las seis 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 veinte intervalos iguales, cuyos extremos son delimitados por adjetivos antónimos (bajo/alto, bueno/malo, poco/mucho).

En el capítulo 3. [Metodología](#) se mostrará un ejemplo de aplicación de esta métrica.

2.5.2. Consciencia de la Situación: Método SART

La métrica para determinar la consciencia de la situación del operador al realizar una tarea que estudiamos es la “*Situational Awareness Rating Technique*” (SART). Esta técnica se basa en 3 aspectos globales que se dividen en 10 variables totales. 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. 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 [15],[16]. (ver tabla 2.2).

Aspectos	Variables	Definición
Demanda de atención	Inestabilidad	Probabilidad de que la situación cambie abruptamente.
	Variabilidad	Cantidad de variables que requieren atención.
	Complejidad	Grado de dificultad de la situación.
Aporte de atención	Preparación	Grado de preparación del operador.
	Capacidad Mental	Capacidad mental para manejar nuevas variables.
	Concentración	Capacidad cognitiva para hacerle frente a la situación.
	División de la atención	Cantidad de atención dividida en la situación.
Compresión	Cantidad de información	Cantidad de información recibida y comprendida.
	Calidad de la información	Grado de la calidad de la información.
	Familiaridad	Grado de entendimiento del modelo mental de la situación.

Tabla 2.2: Aspectos de la métrica SART.

Es una métrica fácil y rápida que requiere muy poco entrenamiento, es aplicable a muchas áreas y provee un buen nivel de diagnóstico. Como contrapunto, este método está influenciado enormemente por la experiencia propia del operador, siendo éste un punto clave. Además, es muy importante darse cuenta del nivel de consciencia propio, es decir qué tan atento está el operador de su consciencia.

Una vez realizada la tarea y con las variables ya evaluadas por el operador en base a su experiencia, mediante una ecuación que relaciona los 3 aspectos y nos da un resultado numérico de la consciencia de situación. En el capítulo 3. [Metodología](#)

se detalla un ejemplo donde veremos que un resultado con valor numérico elevado nos indica que el operador posee una buena consciencia de la situación durante la ejecución de la tarea y por lo tanto dicha actividad se completa de la manera deseada.

2.5.3. 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). Esta se basa en definir un conjunto de comportamientos específicos como ejemplo para calificar el rendimiento deseado del grupo de trabajo a analizar. Observadores externos de las tareas recogen resultados fuera de lo convencional e identifican los eventos y comportamientos que desencadenan dichos incidentes adversos [17].

Las ventajas de este método radican en su validez a través de diversos tipos de trabajos, cuya mecánica es simple y fácil de usar. No requiere un entrenamiento previo y es completamente imparcial, ya que evalúa únicamente el comportamiento y no a la persona que lo ejecuta. Por el contrario, dado que es necesario generar múltiples ejemplos de comportamiento para una tarea, puede ser tedioso y demandante de tiempo para lograr una medición eficiente [18].

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 juicios de valor personales.

Una metodología de aplicación puede ser dividir el procedimiento en 5 partes:

- Identificación y definición del rendimiento buscado;
- Generación de los ejemplos de comportamiento;
- Asignación de los ejemplos a cada actividad;
- Dar calificación a los ejemplos propuestos;
- Elegir la escala de anclaje para las mediciones.

Pasar de una lista de conocimientos técnicos deseados a una lista de comportamientos ejemplares suele ser un trabajo complejo. La principal idea para simplificar esto, consiste en categorizar las tareas a realizar y luego dentro de cada una de ellas, volver a demarcar subcategorías que muestran distintas combinaciones de medidas de desempeño con lo que pueda evaluar el comportamiento del operador. Para concluir, el método BARS es una práctica aplicable a una extensa línea de industrias, capaz de mejorar el trabajo en equipo y el ambiente laboral.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se desarrolla de manera detallada las metodologías utilizadas al realizar los estudios de la asignación de funciones, las fases que la componen, los interrogantes presentes y la secuencia de trabajo para completar y aprobar la FA para todas las funciones definidas. Además se presentaran las métricas que evalúan el desempeño del operador, explicando como deben obtenerse las mediciones y cuales son los pasos a seguir para su ejecución. Se detallan las métricas subjetivas mediante un ejemplo sobre una función manual, definida por nuestra FA.

3.1. Metodología de la asignación de funciones

La asignación de funciones es un proceso 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 [3].

En la primera fase se desarrollan hipótesis que resuelvan los problemas de diseño, cumpliendo los requisitos funcionales de los sistemas. Luego durante la fase de evaluación, se resuelve si las primeras suposiciones e hipótesis son adecuadas o requieren correcciones y/o cambios, analizando la capacidad física y cognitiva del operador, así como también costos económicos hasta alcanzar un resultado satisfactorio. El método se muestra en la figura 3.1. Se detallan ambas fases a continuación.

3.1.1. La Fase Hipotética

Las funciones se asignan a seres humanos, a máquinas o a una combinación de ambos, aplicando una serie de siete (7) preguntas ordenadas, tal que permiten determinar el resultado de la FA para cada función siguiendo el camino del diagrama [19] (ver figura 3.2).

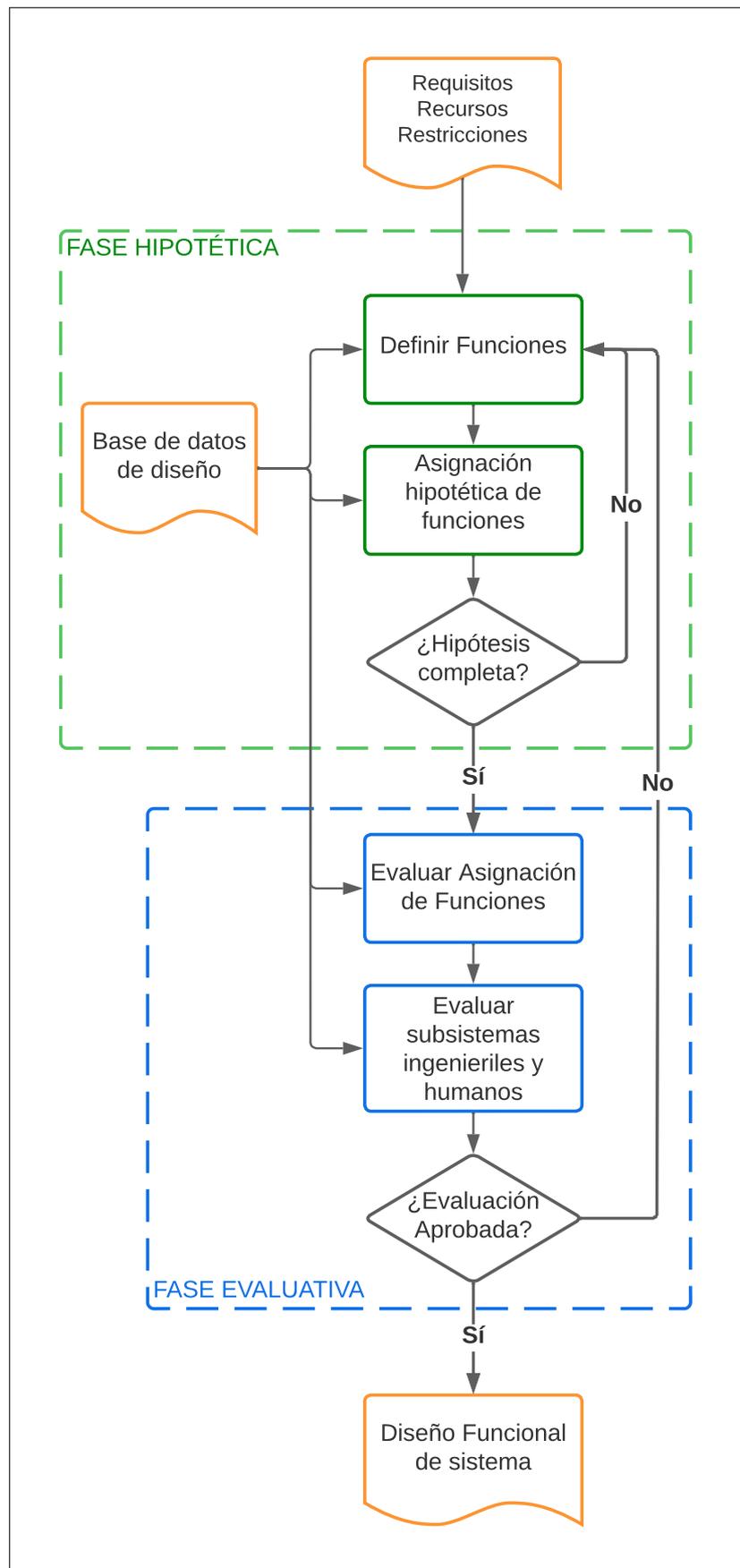


Figura 3.1: Diagrama de la metodología de la Asignación de Funciones.

1. ¿Es obligatoria la automatización?
 - 1.a ¿Las condiciones de trabajo son hostiles para el trabajador?
 - 1.b ¿La rapidez de respuesta excede la capacidad humana?
 - 1.c ¿Existe un requisito de la autoridad regulatoria?
 - 1.d ¿Es una función de seguridad que se requiere que sea automática?
2. ¿Es técnicamente posible la automatización?
 - 2.a ¿Es el costo económico es aceptable?
3. ¿Es obligatoria la actuación humana?
 - 3.a ¿Existe un requisito de la autoridad regulatoria?
 - 3.b ¿Existen requisitos o políticas que aconsejan eso?
 - 3.c ¿Es la automatización técnicamente imposible?
4. ¿Es posible y razonable la actuación humana?
 - 4.a ¿Las condiciones de trabajo son aceptables para el trabajador?
 - 4.b ¿La rapidez de respuesta requerida es acorde con la capacidad humana?
 - 4.c ¿Es una función de seguridad que requiere la intervención humana?
5. ¿Se prefiere la automatización?
 - 5.a ¿El automatismo se desempeña mejor, incluso donde la acción humana es capaz de lograr el objetivo?
 - 5.b ¿El rol del hombre recae en observar instrumentos y parámetros?
6. ¿Se prefiere la actuación humana?
 - 6.a ¿La acción humana tiene mejor desempeño y es mas fiable que el automatismo?
 - 6.b ¿El ser humano realiza tareas manuales relevantes, aunque existan tareas realizadas por entes automáticos?
7. ¿Se necesita algún tipo de soporte automático/manual?
 - 7.a 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.

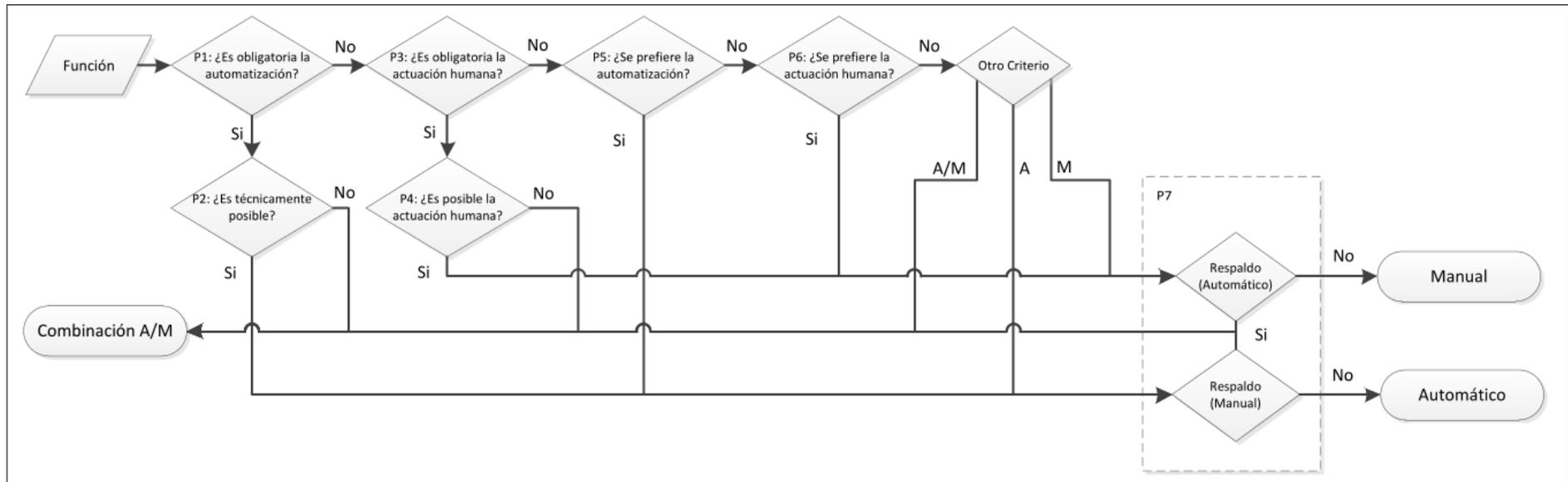


Figura 3.2: Diagrama de Flujo de las Preguntas en la AHIF.

Con las respuestas a estas preguntas se logra la primera asignación hipotética inicial de funciones (*AHIF*). Las preguntas dentro de cada categoría se utilizan para dejar en claro cuál es el objetivo de la pregunta y qué busca encontrar con la respuesta. Esto permite obtener una primera impresión de la distribución de funciones entre los distintos entes automáticos y manuales. Con esta asignación preliminar se ejecuta la siguiente fase.

3.1.2. La Fase Evaluativa

Esta etapa consiste en contestar una serie de preguntas separadas en cuatro pasos que nos darán como resultado final la aprobación o rechazo de nuestra AHIF [20]. Este nuevo conjunto de preguntas considera al futuro operador de la planta, su aspecto psicofísico, su capacidad cognitiva y por último, pero no menos importante, el aspecto económico de aplicar las funciones acorde a las hipótesis realizadas (ver figura 3.3).

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 para cumplir la función que le resultó asignada. En este caso no se consideran los aspectos humanos como las emociones, fatiga e intereses.
 - 1.a ¿Tiene el operador suficiente consciencia de la situación?
 - 1.b ¿El nivel de planificación es bajo?
 - 1.c ¿El margen de tiempo para decidir es alto?
 - 1.d ¿La carga de trabajo es baja?
2. ¿Cumple el operador con los requisitos de ejecución humanos?
En esta pregunta el ser humano es tratado en su totalidad, considerando tanto su performance física, mental y social para lograr el objetivo de la función a ellos asignadas.
 - 2.a ¿El entorno de operación es seguro?
 - 2.b ¿El nivel de estrés y fatiga es adecuado para la actividad?
 - 2.c ¿El riesgo de fiabilidad humana es bajo o no existe?
 - 2.d ¿El acceso a los dispositivos de HMI es fácil?
3. ¿La asignación de funciones compensa económicamente?
Apartado que estudia la relación costo-beneficio de implementar la asignación hipotética con todos los elementos necesarios para alcanzar el objetivo de la función.

3.a ¿Es aceptable el costo económico de la asignación hipotética?

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 a través de la experiencia propia del trabajador, y la complejidad del trabajo.

4.a ¿Las tareas son poco frecuentes?

4.b ¿Las tareas son simples, con un nivel adecuado de complejidad?

4.c ¿El modelo mental requerido es simple?

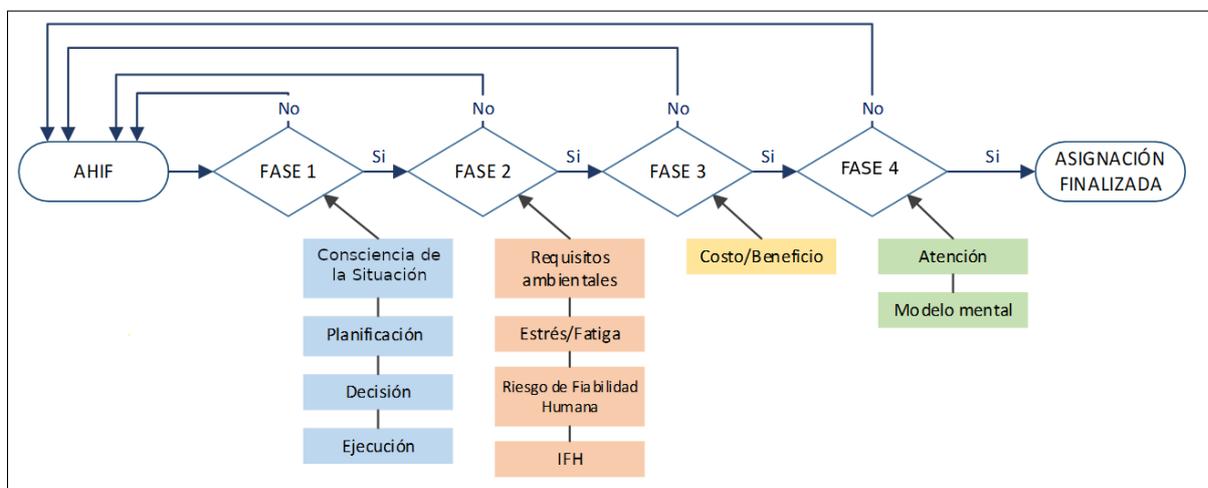


Figura 3.3: Diagrama de Flujo de la Fase Evaluativa.

Una vez resueltos estos interrogantes, se puede definir si la asignación hipotética de funciones fue aceptada o no. En este último caso, es necesario redefinir las funciones rechazadas y nuevamente realizar todo el análisis y evaluación.

3.1.3. Acciones de control y Carga de trabajo

Existen dos pasos adicionales para la asignación de funciones. En esta última etapa se analizan las acciones de control automáticas, y las acciones de control humanas, como también la carga de trabajo en el área de procesamiento [19]. La descripción de las **acciones de control** se requiere para tener en claro qué actividad debe realizar cada parte (entes automáticos y entes manuales) y si éstas son posibles alcanzar con los elementos disponibles en el diseño funcional. Tiene por efecto recopilar toda la información necesaria para comprobar la selección de los elementos pertenecientes al diseño hipotético inicial. De esta manera se puede ver claramente cada función y cómo son los parámetros de control de ella, siendo capaz de diferenciarse si requieren algún soporte automático/manual que no se tuvo en cuenta anteriormente.

Para describir el análisis del segundo apartado, se utiliza una tabla para estimar la **carga de trabajo en el área de procesamiento** asignada a cada requisito de control manual, donde se establecen 3 niveles mediante ejemplos para cada una de las áreas de carga de trabajo, con valores numéricos (*Bajo: 1 ; Medio: 3 ; Alto: 5*)[ver tabla 3.1]. Una vez determinados los niveles de carga de trabajo en cada área de análisis, se calcula la carga total, y en función a este valor se aprueba la asignación hipotética o bien se busca una alternativa para disminuir la carga sobre el operador. Las áreas centrales de procesamiento son las siguientes:

- **Consciencia de la situación:** análisis de la percepción de la información del estado de planta por parte del operador.
- **Planificación:** análisis de la planificación necesaria para la ejecución de tareas.
- **Decisión:** análisis del margen de tiempo disponible para la toma de decisiones.
- **Ejecución:** análisis de la carga de trabajo necesaria estimada (y la ejecución de tareas de forma única, en paralelo o múltiple).

	Baja - 1	Media - 3	Alta - 5
Consciencia de la situación	Reconocimiento de alarmas. Verificar parámetros o estados de componentes.	Monitorear parámetros. Verificar respuesta de control. Calcular.	Recibir información vía telefónica u oral. Leer planos o procedimientos.
Planificación	Planificar en base a procedimientos.	Predecir estado en base a acción o inacción.	Diagnosticar.
Decisión	Tomar decisión teniendo en cuenta hasta 2 parámetros o señales. Tiempo para tomar una decisión alto.	Tomar decisión teniendo en cuenta hasta 4 parámetros o señales.	Tomar decisión en poco tiempo.
Ejecución	Actuación de comandos en pantallas o paneles. Ajustar referencia de controlador.	Configurar y actuar sobre controles en base a distintos protocolos.	Configurar muchos componentes de una determinada manera y con un ordenamiento muy estricto.

Tabla 3.1: Descripción de las áreas centrales de procesamiento.

Con estas fases se puede realizar el análisis de las funciones y obtener la AHIF, para luego evaluar el listado de funciones y finalmente aprobar o rechazar total o parcialmente la FA.

3.2. Metodología de V&V

Para comenzar con este apartado se aclara que los ejemplos desarrollados se hicieron bajo suposiciones del equipo de HFE del Departamento de Control de Procesos, sin haberlo aplicado a simulaciones de escenarios donde haya intervenido un operador.

Dentro de las métricas para evaluar el desempeño del operador se pueden distinguir las objetivas y las subjetivas (ver 2.5). El primer grupo se compone de parámetros claros y concisos donde observadores externos, generalmente encargados del área de V&V, toman las mediciones durante la ejecución de la función, sin interferir de ninguna manera en esta. Si bien cada caso de estudio puede tener distintas variables a analizar, en nuestro caso nos inclinamos en utilizar un conjunto simple de características a evaluar. Estas son:

- Tiempo de ejecución;
- Frecuencia de la función;
- Cantidad de Recursos utilizados;
- Tiempo de operador requerido para cada función (para funciones manuales y automático/manual).

En el desarrollo futuro del Proyecto CAREM 25, cuando estén definidos y disponibles los elementos de HMI y los operadores que realizaran el trabajo, es posible agregar nuevos parámetros que se consideren adecuados a analizar para cada una de las funciones. Estos pueden tener en cuenta la cantidad de pantallas utilizadas para recopilar la información necesarias para la función, y la ubicación de estas. Además se pueden contabilizar la cantidad de componentes (pantallas táctiles, botones, etc) que se tienen que manipular para realizar la función y su distribución en la sala de control.

Como segundo grupo de mediciones para conocer el desempeño del operador están las métricas subjetivas, las cuales analizan la carga de trabajo, la consciencia de la situación, y el trabajo en equipo dentro del ambiente de trabajo para las funciones donde el operador tiene un papel principal. En nuestro caso particular, se aplicaron estas métricas a las funciones asignadas como “*manuales*”, mientras que aquellas asignadas como “*automático/manual*” serán revisadas mas adelante cuando estén completamente definidas por el equipo de V&V encargado del Proyecto CAREM 25. Para recordar, las métricas que se desarrollaron son las siguientes:

- Carga de Trabajo: NASA-TLX
- Consciencia de la Situación: SART
- Trabajo en Equipo: BARS

3.2.1. Aplicación de la métrica 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. 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 [14].

Fase de ponderación

Se realizan comparaciones entre las seis (6) subescalas, enfrentándolas entre sí de a dos (2) por vez, (ver tabla 2.1) 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). A continuación se muestran como se evalúan las subescalas entre sí (ver tabla 3.2). Con el resultado final se cuenta la cantidad de veces que se seleccionó una variable y su suma total determina el peso de esta para cada función. En este ejemplo, estas últimas fueron divididas en tareas más simples donde se evalúan cada una, con la configuración de pesos ya establecida.

VS	Física	Temporal	Esfuerzo	Rendimiento	Frustración	Total
Mental	M	T	M	M	Fr	3
Física	-	T	E	R	Fr	0
Temporal	-	-	T	T	T	5
Esfuerzo	-	-	-	E	E	3
Rendimiento	-	-	-	-	Fr	1
Frustración	-	-	-	-	-	3

Tabla 3.2: Ejemplo de comparación de las subescalas.

Fase de Puntuación

Los operadores evalúan la tarea una vez realizada mediante una representación de veinte (20) intervalos iguales, cuyos extremos son delimitados por adjetivos antónimos (bajo/alto, escaso/excesivo). Luego esta puntuación se traduce a una escala de cien (100) puntos, y se multiplica por el peso que tiene cada variable. Finalmente el resultado cae en una media ponderada de cada tarea. Esta última se promedia para alcanzar el valor final de la carga de trabajo de la tarea estudiada.

		Carga de trabajo: NASA-TLX							
Orden de Función	Función de Sistema/ Tarea	AHIF	Exigencia Mental (M)	Exigencia Física (F)	Exigencia Temporal (T)	Esfuerzo (E)	Desempeño (R)	Frustración (Fr)	Media Ponderada de la Función
1	Comprobar estado general del SAIM	M							
	Inspección visual del SAIM		10	7	7	10	10	0	35.00
	Prueba de actuadores y motores		5	10	15	10	5	3	44.67
	Prueba de software		15	0	10	5	10	3	43.00
	Prueba de las herramientas		5	10	15	5	5	3	39.67
	Prueba del MABRIP		5	5	10	10	5	0	33.33

Tabla 3.3: Ejemplo de la métrica NASA-TLX.

En la tabla 3.3, se muestra un ejemplo de la aplicación de la métrica NASA-TLX sobre una función manual “*Comprobar estado general del SAIM*”, la cual fue dividida en tareas mas simples para que estas sean analizadas en cada uno de los aspectos detallados en la tabla 2.1. En la tabla 3.3 se muestran como cada operador evalúa en una escala entre [0 - 20] a las distintas tareas de la función una vez realizadas. Con estos datos, se traducen a una escala de cien (100) puntos y se multiplica por el peso asignado a cada subescala. El último paso consiste en agrupar todos los resultados de las subescales mediante una media ponderada para cada tarea dentro de una función. (ver ejemplo de aplicación en 4.3.1).

Con esto se puede determinar que un valor elevado en la media ponderada nos indica una carga de trabajo importante, y que debe plantearse un límite máximo, por el cual si una tarea o función lo supera, esta última debe redefinirse, desagregándola en partes mas simples y volver a evaluar la métrica.

Así como también se puede visualizar independientemente si los pesos otorgados a cada aspecto se condicen con los valores atribuidos por los operadores. Es decir que se puede comprobar si para una dada función, una subescala cuyo peso resultante en la comparación binaria de aspectos fue elevado, los operadores le atribuyen un valor alto, se puede decir que la suposición de carga de trabajo para esa función es correcta. Por el contrario, si una subescala tiene un peso de valor nulo o cercano a cero, pero los operadores la califican con valores altos, puede ocurrir que es necesario replantearse las comparaciones binarias y volver a calcular los pesos de los seis aspectos de la métrica (ver tabla A.6 en apéndice A).

3.2.2. Aplicación de la métrica SART

A continuación se detalla como se ejecuta la métrica SART para el mismo caso de ejemplo de la función “Comprobar estado general del SAIM”, que se utiliza para la métrica NASA-TLX. En la tabla 3.4, se muestra como los operadores evalúan cada una de las diez variables detalladas en la tabla 2.2, con un valor entre uno (1) [bajo] y siete (7) [alto] para las tareas de la función a estudiar. Con cada subtotal de los tres (3) aspectos, se calcula el valor de la métrica (denominado *SA*) para cada una de las tareas como la ecuación 3.1, y con ello determinar si la tarea requiere alguna modificación en su definición [16].

$$SA : \text{Comprensión} - (\text{Demanda} - \text{Aporte}) \quad (3.1)$$

Consciencia de la situación: SART																
ID	Función de Sistema/ Tarea	AHIF	Demanda de atención				Disponibilidad de atención				Comprensión de la situación				SA Resultado	
			Inestabilidad de la situación	Variabilidad de la situación	Complejidad de la situación	Subtotal	Preparación	Capacidad mental disponible	Concentración	División de la atención	Subtotal	Cantidad de información	Calidad de la información	Familiaridad		Subtotal
1	Comprobar estado general del SAIM	M														
	Inspección visual del SAIM		1	3	2	6	7	6	6	7	26	7	6	7	20	40
	Prueba de actuadores y motores		4	4	7	15	7	6	6	6	25	6	5	6	17	27
	Prueba de software		1	1	4	6	7	5	5	6	23	7	7	5	19	36
	Prueba de las herramientas		4	4	4	12	7	6	6	6	25	6	5	6	17	30
	Prueba del MABRIP		3	3	2	8	7	5	5	5	22	5	5	5	10	24

Tabla 3.4: Ejemplo de la métrica SART.

En base a la escala utilizada se define el rango numérico con el cual trabajar y su significado. El peor caso se da cuando el operador no posee capacidad de atención y su familiaridad con el proceso es nula, y en este caso el valor mínimo es de catorce puntos negativos (-14), significando que el puntaje del operador es *insuficiente* y se requiere tomar medidas urgentes para mejorar la situación del mismo. Por el contrario, si la tarea a analizar es una tarea simple cuya demanda de atención es escasa, el operador tiene como único objetivo ejecutar esa tarea y además es experimentado con el proceso, el valor máximo posible es de cuarenta y seis (46) puntos, obteniendo un resultado *óptimo* de la métrica para ese operador y esa tarea en particular.

3.2.3. Aplicación de la métrica BARS

En nuestro caso de estudio existen dos funciones que requieren trabajo en equipo y requieren la aplicación de la métrica BARS. Para evaluar esta métrica se desarrollaron diversos ejemplos de comportamientos que generan una serie de resultados, desde el caso óptimo, hasta un caso cuyo resultado sea insatisfactorio [17]. Esta lista de comportamiento se le asigna una graduación numérica, y cada operador evalúa a sus colegas de trabajo en base al comportamiento de cada uno de ellos.

Ejemplos de Comportamientos	Escala
Requiere supervisión constante para realizar el trabajo y alcanzar un resultado útil.	1
Requiere ayuda de sus pares de manera intermitente.	3
Realiza el trabajo de manera eficiente sin supervisión.	5
Requiere llamado de atención para registrar los resultados acorde a los lineamientos de la empresa.	1
Registra los resultados sin declarar eventos inusuales.	3
Presenta los resultados obtenidos de manera clara e informa de cualquier situación inusual.	5
Tiende a trabajar en solitario, sin predisposición a comunicarse.	1
Comunicación acorde de resultados, sin aporte de ideas o sugerencias al trabajo.	3
Comunicación excelente y predisposición a mejorar el ambiente de trabajo	5

Tabla 3.5: Tabla de ejemplos de comportamiento.

En base a estos ejemplos de comportamiento (ver tabla 3.5), los operadores se evalúan entre sí en las situaciones de trabajo que se presentan a la hora de trabajar en conjunto para alcanzar un resultado satisfactorio de la función [21]. En la tabla 3.6 se muestran como ejemplo las dos funciones de trabajo en grupo, con sus respectivas tareas, donde cada operador fue evaluado por su par en cada tarea con la escala numérica tomada desde la tabla 3.5. Con esta graduación se obtiene el resultado final para cada operador involucrado en la función. En la métrica BARS para el trabajo en equipo, un valor numérico alto se considera una mejor calificación del operador.

ID de Función	Función / Tarea	Operador 1	Operador 2	Operador 3
28	Análisis de datos relevados	18	16	10
	Conocimientos técnicos relevantes para el desarrollo del trabajo	5	3	3
	Conocimiento del proceso de donde se obtienen los datos a estudiar	5	3	1
	Transmitir los resultados obtenidos	3	5	3
	Comunicación y participación dentro del grupo de trabajo	5	5	3
31	Cambiar sellos de la brida	13	9	-
	Conocimientos técnicos relevantes para el desarrollo del trabajo	5	3	-
	Comunicación y participación dentro del grupo de trabajo	3	5	-
	Registro escrito del mantenimiento y estado de la brida	5	1	-

Tabla 3.6: Ejemplo de aplicación de BARS.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Primeros Resultados de la FA

Se presenta la primera lista de funciones que se definió en base a los archivos del Proyecto CAREM 25 [22] y se analizó el nivel de automatismo de acuerdo a la metodología presentada en la sección 3.1. En nuestro caso inicialmente se definieron treinta y dos (32) funciones las cuales podemos separar en los tres grupos: *Automáticas (A)*, *Manuales (M)*, y *Automáticos/Manuales (A/M)* (ver figura 4.1).

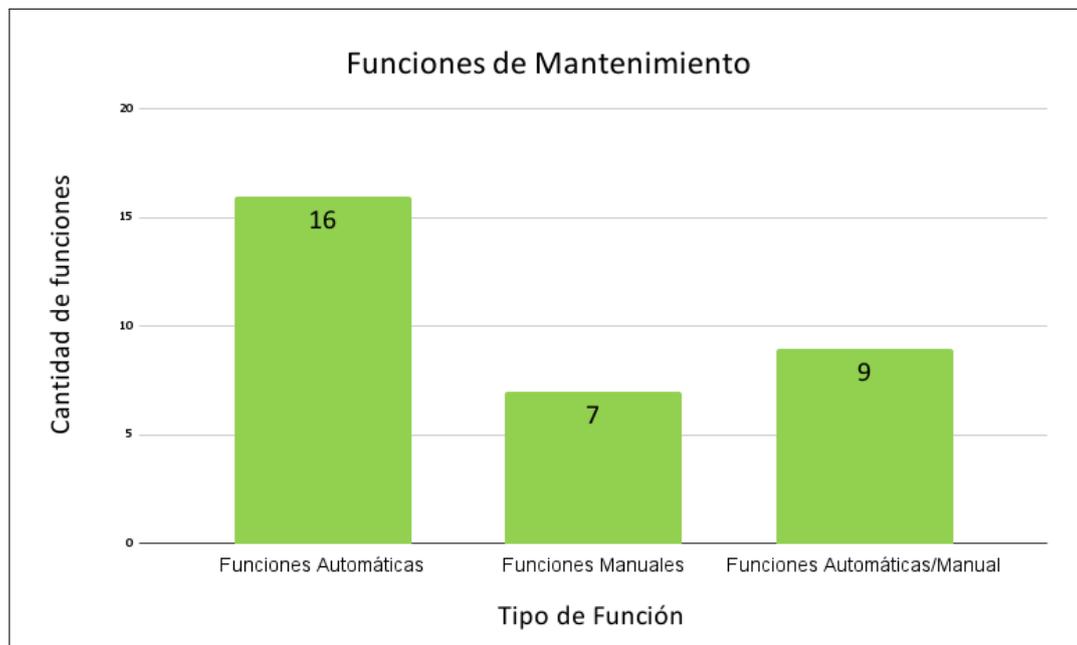


Figura 4.1: Distribución Inicial de las Funciones.

Del total de las treinta y dos (32) funciones definidas inicialmente, se obtuvieron dieciséis (16) funciones automáticas, siete (7) funciones manuales y nueve (9) funciones automáticas/manuales, donde estas últimas cuentan con un soporte manual o automático respectivamente. Cabe destacar que estas funciones se cumplen en orden secuencial haciendo que la carga de trabajo en el área de procesamiento de cada función sea independiente una de otra.

Almacenamiento de 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)	
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)	Recambio del Reel de SIES (M)	
		Desanclar MABRIP (A)		
		Retirar MABRIP de la zona de trabajo (A)		

Tabla 4.1: Lista Inicial de Funciones.

Para la aplicación de la metodología según la sección 3.2 de V&V se hizo enfoque en las funciones manuales. La tabla 4.1 muestra las funciones presentes en la primera AHIF satisfactoria que realizamos.

4.2. Resultados Finales de la FA

Los resultados finales de la FA se obtuvieron mediante un contraste de las funciones definidas por el área de Ingeniería de Factores Humanos y aquellas desarrolladas por el área de Robótica. De ésta comparativa frente a las treinta y dos (32) funciones presentadas anteriormente, se llegó a la conclusión de agregar tres (3) funciones a nuestra primera lista. La razón de esto radica en que se determinaron múltiples procedimientos de trabajo que anteriormente estaban sin definir.

Estas funciones son (ID - Función - FA):

- 12 - *Guardado de tuercas* - A
- 21 - *Trabajo sobre los dispositivos de pérdidas de carga (DPC)* - A/M
- 22 - *Guardado de los DPC* - A

La lista completa de las funciones en el orden de secuencia pueden verse en el apéndice A, tabla A.1. Con estas nuevas funciones se obtienen treinta y cinco (35) funciones en total, las cuales se dividen en dieciocho (18) funciones automáticas, siete (7) funciones manuales, y diez (10) funciones automáticas/manuales (ver figura 4.2).

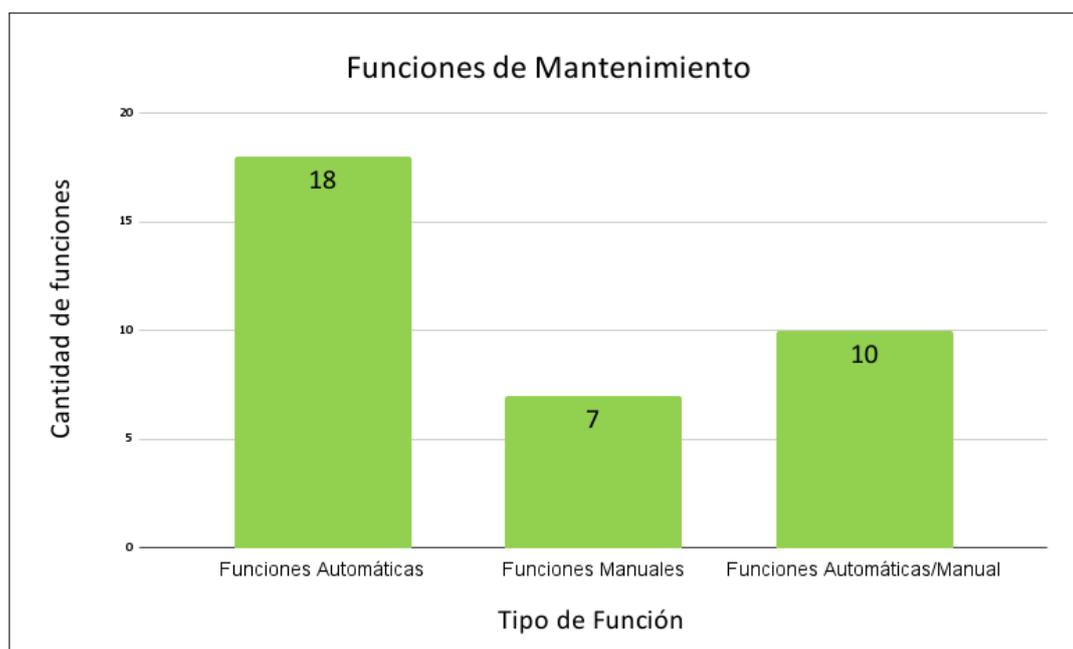


Figura 4.2: Distribución Final de Funciones.

La tabla 4.2 ubica las 3 funciones agregadas bajo el grupo de funciones llamado *Acceso a la placa tubo*, ya que son funciones que deben realizarse previas a la inspección de los tubos y soldaduras.

A modo ejemplo de la aplicación de AHIF, se seleccionaron tres (3) funciones distintas asignadas como automáticas, automáticas/manuales, manuales para mostrar como

Almacenamiento de 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)	
Abrir puerta del recinto de guardado (A/M)	Anclar Rack Herramientas (A)	Guardado de tuercas a reutilizar(A)	Relevo de datos de cada cuerpo de tubo (A)	
Iniciar movimiento del SAIM (A)	Desanclar Rack Herramientas (A)	Retirar Herramientas utilizadas (A)	Retirar la sonda de inspección (A)	
	Desanclar SAIM (A)	Dejar Herramientas en el Rack (A)	Análisis de los datos relevados (M)	
	Retirar SAIM de la zona de trabajo (A)	Posicionar MABRIP frente a la brida (A/M)	Inspección de la soldadura del Plenum (A/M)	
		Anclar MABRIP (A)	Recambio del Reel de SIES (M)	
		Retirar Brida ciega con MABRIP (A/M)		
		Desanclar MABRIP (A)		
		Retirar MABRIP de la zona de trabajo (A)		
		Trabajo sobre los Dispositivos de pérdida de Carga [DPC] (A)		
		Guardado de los DPC (A)		

Tabla 4.2: Lista Final de Funciones.

se realiza el estudio. Se muestran las tablas detalladas del proceso de FA para cada función en el apéndice adjunto A.

En la tabla 4.3 se establece el resultado de la Asignación de Funciones con el resumen de las respuestas a las siete preguntas de la fase hipotética planteadas en la sección 3.1.1 (ver en apéndice, la tabla A.2 y la tabla A.3). A continuación, las soluciones a los cuatro interrogantes de la fase evaluativa presentados en la sección 3.1.2 (ver en apéndice, la tabla A.4).

El último apartado muestra la calificación numérica que obtuvo cada función en el área central de procesamiento de acuerdo a la carga de trabajo en el área central de procesamiento (ver tabla 3.1).

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

Tabla 4.3: Ejemplo de FA: Fase Hipotética y Fase Evaluativa.

Visualizando el apartado “*carga en área central de procesamiento*” de la tabla A.5 del apéndice A se distingue que muchas funciones al ser divididas en tareas secuenciales, la carga de trabajo disminuye, permitiendo que dicha función sea ejecutada de manera satisfactoria. Se puede destacar como valor límite el valor 10 (diez) total de carga de trabajo aceptable para un operador. Como caso a distinguir, la función 32: “*Recambio del Reel del SIES*” es una función de ejecución compleja que alcanza un valor de catorce (14) puntos, por lo que se definió realizarla con dos (2) operadores trabajando en conjunto, dividiendo la carga de trabajo entre ambos. La razón radica en que éste es un trabajo manual de gran esfuerzo físico, y en condiciones adversas debido a que se encuentran dentro del recinto del reactor, por lo que el tiempo de trabajo es un aspecto crítico para la integridad de los operadores. Esta función consiste en el cambio de la sonda de inspección que se introduce en cada uno de los GVs, con el fin de relevar datos para estudiar el estado físico de los tubos del GV. De esta forma se puede disminuir la carga de trabajo, aprobando la fase evaluativa de la AHIF.

La tabla 4.4 que muestra los requisitos de control, y las acciones de control que son necesarias tomar para cumplirlos, separadas en entes automáticos y manuales. Además se agregan observaciones importantes que definen cómo se ejecuta el soporte automático o manual que requiere la función (en los casos que corresponde). Finalmente se justifica el resultado obtenido de manera simple, abordando la principal razón por la que se asignó el nivel de automatismo propuesto (ver en apéndice, la tabla A.5).

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	Posición y velocidad del cabezal de inspección	Movimiento del cabezal de inspección	Inspección visual durante la revisión	SA: Herramienta debe moverse a velocidad 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	2 operadores trabajando en conjunto	Operación crítica para el corrector funcionamiento. Automatización con costo excesivo. Control dosis de radiación

Tabla 4.4: Ejemplo de FA: Acciones y Requisitos de Control.

Con estos datos se define la FA para las funciones definidas como se muestra en la tabla A.1 del apéndice A. En base a estos resultados continuamos con análisis de V&V para las siete (7) funciones *Manuales*.

4.3. Resultados de V&V

El proceso de V&V parcial sobre las funciones manuales y automáticas/manuales resulta de difícil ejecución durante esta etapa de diseño donde todavía falta por diseñar la interfaz humano-máquina, y seleccionar a los operadores encargados de las actividades estudiadas. Frente a esta situación se presentan los lineamientos necesarios para lograr una evaluación de V&V.

Las métricas objetivas mencionadas en el apartado de 2.5 del capítulo 2. Marco Teórico, tales como tiempo de ejecución, cantidad de recursos empleados, y frecuencia de la tarea, entre otras, serán registradas por observadores externos a la tarea sin interrumpir o interferir durante el desarrollo de la función. De esta forma se busca identificar errores por omisión y posibles acciones que desvíen la atención del operador hacia otras tareas secundarias. Para alcanzar mediciones de estas métricas objetivas que sean reales se requiere, no solamente que los elementos y componentes con los que cuenta la planta de potencia estén definidos y disponibles para su uso, sino que además debemos tener en claro quiénes van a ser los operadores encargados de cada uno de ellos. Por lo tanto queda pendiente su análisis hasta que estos elementos mencionados queden definidos.

Por el lado de las métricas subjetivas mencionadas en las secciones 2.5.1, 2.5.2 y 2.5.3 ocurre una situación similar donde el estado actual del proyecto CAREM 25 no permite realizar una evaluación parcial de las funciones definidas en el FA, por lo que se presentan los ejemplos de aplicación de dichas métricas a las funciones asignadas como “*funciones manuales*” únicamente. En nuestro estudio, este grupo de funciones entra bajo esta categoría al responder afirmativamente las preguntas N° 3 y N° 4 de la AHIF. Estas preguntas hacen alusión a si es obligatoria la actuación humana debido a normativas gubernamentales o que la automatización sea técnicamente imposible (ver sección 3.1.1), por lo que en estas funciones los automatismos no tienen participación alguna y son menos propensas a cambios de categorías durante el futuro del diseño.

Las funciones manuales analizadas son:

- 1 - Comprobar estado general del SAIM.
- 3 - Comprobar si el camino está despejado.
- 19 - Inicio de tarea.
- 20 - Seleccionar tubo a inspeccionar.
- 25 - Análisis de los datos relevados.
- 28 - Cambiar sellos de la brida.
- 29 - Recambio del Reel de SIES.

4.3.1. Resultado de la métrica NASA-TLX

Se estudiaron las 7 funciones manuales bajo la métrica *NASA-TLX* (ver sección 3.2.1). Estas fueron desagregadas en tareas mas simples para lograr el análisis correspondiente y poder determinar si alguna tarea en particular tiene una carga elevada de trabajo y por lo tanto seria necesario una nueva definición de esa tarea. El análisis ejecutado muestra resultados satisfactorio para las siete (7) funciones manuales. Se presenta a modo de ejemplo en el apéndice la tabla A.6 completa.

La tabla 4.5 muestra los resultados de las comparativas binarias realizadas por los operadores que luego se utilizarán para alcanzar un valor de carga de trabajo para cada tarea. La suma de la cantidad de “victorias” de cada variable conforma el peso que tendrá está misma en la fase de puntuación.

Par de Variables	Resultado
M - F	M
M - T	T
M - E	M
M - R	M
M - Fr	Fr
F - T	T
F - E	E
F - R	R
F - Fr	Fr
T - E	T
T - R	T
T - Fr	T
E - R	E
E - Fr	E
R - Fr	Fr

Tabla 4.5: Tabla de comparaciones binarias.

La tabla 4.6 resume el peso de cada variables.

Variables	Peso
Exigencia Mental (M)	3
Exigencia Física (F)	0
Exigencia Temporal (T)	5
Esfuerzo (E)	1
Rendimiento (R)	1
Frustración (Fr)	3
Total	15

Tabla 4.6: Distribución de los pesos de las variables.

Cabe destacar que existe una tarea dentro de la función 28 - *Cambiar sellos de la brida*, específicamente en la tarea *Retirar sellos de la brida* que posee un valor elevado de carga de trabajo, pero debe tenerse en cuenta que esta actividad es realizada por dos (2) operadores, por lo que la carga de trabajo se ve dividida entre ambos. Esto hace que la tarea sea acorde a la carga de trabajo tolerable por cada operador y por lo tanto la función es aceptada.

4.3.2. Resultado de la métrica SART

Para el caso de la conciencia de situación, la métrica **SART** fue utilizada para el análisis de las mismas siete (7) funciones manuales mencionadas anteriormente en 4.3. Los resultados obtenidos fueron calculados mediante la ecuación 3.1, detallada en la sección 3.2.2. Cabe recordar que en el caso de este estudio, los valores numéricos finales entraban en el rango [-14 *ineficiente* ; 46 *óptima*]. El resultado de esta métrica es muy satisfactorio gracias a que consideramos que la capacidad de atención del operador analizado es elevada y posee experiencia en el trabajo de plantas nucleares de potencia. Otro punto es que las funciones de mantenimiento tienen un orden secuencial, permitiendo que los operadores estén enfocados en una función a la vez. En el apéndice A se encuentra la tabla A.7 completa de la métrica.

4.3.3. Resultado de la métrica BARS

Para la métrica BARS se tienen en cuenta solo dos funciones donde los operadores trabajan en equipo:

- 28 - *Análisis de datos relevados* - M
- 31 - *Cambiar sellos de la brida* - M.

Para este ejemplo es necesario remitirse a la sección 3.2.3, donde se presentan ambas funciones con sus correspondientes ejemplos de comportamientos y la escala para cada uno de estos (ver tabla 3.5). En esta ocasión se estudiaron casos donde aparecen tres (3) y dos (2) operadores donde cada uno evalúa el comportamiento de sus pares frente al trabajo realizado, poniendo especial énfasis en el comportamiento mostrado por los operadores (ver tabla 3.6). Un valor alto en la sumatoria de los comportamientos analizados se considera una mejor calificación del operador.

Dentro de este caso se puede determinar que en la función 28 - *Análisis de los datos relevados*, el operador N°3 es el que obtuvo una puntuación mas baja de sus compañeros, por lo que sería apropiado que se trabaje en mejorar los comportamientos con el valor mas bajo, con el fin de alcanzar un resultado satisfactorio de la función y un agradable ambiente de trabajo.

Para finalizar este capítulo se aclara que, cuando las funciones definidas cumplen con los requisitos técnicos propuestos (o sea aprobar la *verificación*), y además sean capaces de alcanzar el objetivo propuesto en la practica (es decir aprobar la *validación*), se obtuvo un resultado de V&V satisfactorio. Este procedimiento es recomendable aplicarlo cada vez que se crean nuevas funciones o se rediseñan funciones antiguas. Esto puede suceder por descubrir nuevas necesidades durante la operación de la planta o encontrar inconvenientes que no se hubieran tenido en cuenta en el diseño. Estos cambios en las funciones deben ser evaluados por la FA para obtener su categorización y ejecutar la verificación y validación de manera concisa, sin omitir ninguna fase de estudio.

Capítulo 5

Conclusiones

La Ingeniería de Factores Humanos en la industria nuclear brinda metodologías para un diseño consciente de las plantas nucleares de potencia, haciendo especial énfasis en el medio-ambiente, la seguridad de los operadores y de la planta. La importancia de su aplicación radica en los objetivos que se plantean por medio de la NUREG-0711 [2], tales como:

- Las funciones del personal sean completadas satisfactoriamente, cumpliendo los criterios temporales y de rendimiento.
- El diseño permita a los operadores mantener un modelo mental de la planta durante la operación.
- Provea una carga de trabajo aceptable, evitando periodos de sobrecarga laboral.
- El diseño de HMI, los procedimientos, el entrenamiento del personal, y la organización apoyen la consciencia de la situación en todo momento, minimizando el error humano, así como también la detección y corrección de los mismos, permitiendo una rápida recuperación de la planta frente a éstos.

Con estos objetivos se concluye que es primordial la aplicación de las reglas de HFE para el diseño de nuevas plantas nucleares de potencia. Estas guías nos muestra un camino claro a seguir durante el diseño de sistemas robóticos automáticos, permitiendo conocer el nivel de automatismo para cada función y así distribuir de manera eficiente la carga de trabajo entre el personal y los automatismos.

Se cumplió con el objetivo propuesto para la tesis de analizar un caso ejemplo de un sistema robótico: el Sistema Automático de Inspección y Mantenimiento, y asignar las funciones que éste realiza a distintos niveles de automatismos. El desarrollo del caso ejemplo pone a la vista las pautas necesarias para alcanzar una distribución eficiente del nivel de automatismo a asignar a las funciones definidas en el diseño del SAIM. El

trabajo en conjunto de diseñadores, expertos de HFE y los futuros operadores es de suma importancia para lograr esto, sea cual sea el área de la industria.

La Asignación de Funciones es un método conciso y fácil de ejecutar para lograr una distribución apropiada de funciones entre los automatismos y los seres humanos. Su modelo iterativo puede no ser el más eficiente en el aspecto temporal, pero su simplicidad y la capacidad de desagregar cada función en tareas más sencillas y estudiar en detalle cada una de éstas hacen de este método una herramienta muy versátil. El nivel de detalle que puede alcanzarse durante el diseño sirve de diagnóstico frente a funciones cuyas idealizaciones son complejas y permiten conocer características que escapan al sentido común, incluso para expertos en la materia. Además, el proceso pone en claro cuáles son las variables de control a tener en cuenta en la práctica, y esto permite conocer los componentes físicos necesarios para ejecutar dichas funciones, los requisitos que deben cumplir los elementos de HMI y revelar cuántos operadores serán necesarios para un desarrollo satisfactorio de la función.

Este proceso iterativo se realiza cada vez que se redefine una función o bien se crea una nueva. Es recomendable analizar por separado cada función, desagregándolas en tareas simples. Y luego tomar un enfoque más integral y estudiar todas las funciones en conjunto, considerando aquellas que son necesarias ejecutar en paralelo y cuáles en una secuencia determinada. Con esto se puede alcanzar un resultado de la FA que sea realista y de gran utilidad frente a posibles rediseños de funciones.

Sin embargo, no fue posible realizar un estudio económico con distintas opciones de componentes ya que el diseño del SAIM y los HMI no están suficientemente definidos como para conocer la totalidad de los elementos necesarios para ejecutar las funciones satisfactoriamente. Este último apartado se cambió por el estudio de la Verificación y Validación de la Asignación de Funciones realizada, donde se busca establecer pautas y recomendaciones a la hora de diseñar los componentes de HMI y selección del personal, accesibilidad a la información, conocimientos necesarios del operador, la carga de trabajo que debe soportar y ejemplos de comportamientos que se debería tener para lograr un resultado satisfactorio.

Dado que el estado de desarrollo del Proyecto CAREM 25 es muy temprano para lograr un estudio de V&V que arroje resultados concretos, solo se puede destacar la importancia de que este proceso se lleve a cabo en el tiempo acorde. Este análisis se encarga de justificar por mano de los operadores y personal capacitado, el diseño de funciones resuelto por los diseñadores quienes **no** utilizan la instrumentación y sistemas ideados por ellos. Por esa razón es importante, no solo que las funciones definidas cumplan con los requisitos técnicos propuestos (léase aprobar la *verificación*), sino que éstas además cumplan con el propósito esperado de manera satisfactoria (es decir, que

se ratifique la *validación*). Este proceso pone especial énfasis en el apartado humano de los operadores y sus capacidades en el entorno de trabajo, adecuando el trabajo y herramientas a las necesidades del ser humano.

Con el futuro avance del diseño del SAIM pueden aparecer nuevas funciones o redefiniciones de éstas, por lo que se debe recurrir nuevamente al análisis de la FA sin obviar ninguna fase. Esto no invalida nuestro trabajo previo ya que se espera que el proceso sea iterativo, y a medida que los detalles surjan, esto genera nuevas incógnitas que hay que resolver. En nuestro caso, donde los requisitos funcionales ya están resueltos, se prevé que las funciones definidas como “manuales” no sufran modificación alguna, por lo que su asignación ya está clara al haber respondido afirmativamente la pregunta N°3: *¿Es obligatoria la actuación humana?*.

En cuanto a las funciones “automáticas/manuales” tienen una mayor variabilidad, como se ha mencionado, muchas de estas funciones obtienen esta asignación por ser funciones principalmente automáticas que requieren un control visual que confirme que se ejecutaron correctamente ya que el proyecto CAREM es una planta nuclear prototipo, por lo que en el futuro pueden aparecer funciones que caigan en este caso. Esto solo modifica la respuesta a la pregunta N°7 de la FA *¿Se necesita algún tipo de soporte automático/manual?*, y como se comentó anteriormente, el soporte manual sería una comprobación visual de que la función se haya realizado satisfactoriamente.

Una vez alcanzado el diseño final de las herramientas que el SAIM utilizará, existe también la posibilidad de aparezcan nuevas funciones para el proceso, ocurriendo la misma situación que se planteó en el capítulo [4.Resultados](#). Estas funciones afloraron debido al manejo de las herramientas del SAIM y no afectan a las funciones de mantenimiento ya establecidas. Por lo que vimos anteriormente, las 3 nuevas funciones agregadas al final de nuestro estudio se correspondían con acciones de carácter simple y repetitivo, como el de almacenar tuercas y otros elementos para su posterior uso, siendo objetivos claros de que la asignación que obtendrían sea “automática”. Esto se puede asegurar recordando una de las razones del diseño del SAIM, la de **reducir la exposición a la radiación a los operadores**, ya que las herramientas del sistema robotizado cumplen sus funciones dentro del recinto del reactor. Y considerando que las funciones del proceso de inspección y mantenimiento de los GVs se realizan de manera secuencial podemos afirmar que cualquier cambio o rediseño que ocurra en el SAIM, el resultado de la FA para dichas nuevas funciones no afectarán el nivel de automatismo de las ya definidas anteriormente.

Esta hipótesis propuesta presenta un excelente acercamiento a la FA definitoria, ya que se conocen todos los requisitos funcionales de la inspección y el mantenimiento, y de los componentes actuantes en dicho proceso. Además, como se destacó anteriormente,

es un procedimiento cuyas funciones se deben ejecutar en secuencia una tras otra, donde **no** existen funciones entrelazadas que se realicen en paralelo. Cabe aclarar que si hay funciones que se ejecuten en simultáneo con otras, pero éstas no se relacionan entre sí en el momento de su realización, por ejemplo la 21 - *Trabajo sobre los dispositivos de pérdida de carga* y la 31 - *Cambiar sellos de la brida*. Esta última función es realizada por un equipo de trabajo distinto del que continúa a cargo del sistema robotizado, y en otro lugar físico, alejado de la zona de trabajo del SAIM. Esta característica permite asegurar, conforme a que no cambien los requisitos funcionales, que nuestro trabajo en la FA no sufran grandes cambios, y que las posibles nuevas funciones que aparezcan, se incorporen bajo la asignación de funciones automáticas, y no generen grandes cambios en la carga de trabajo de los operadores.

Se puede concluir que la filosofía de la Ingeniería de Factores Humanos busca un cambio de paradigma, donde el ser humano no tenga que adaptarse a la tecnología, sino que sea ésta quien se adapte y amolde a las capacidades y necesidades del ser humano.

Apéndice A

Tablas

Orden	Función del Sistema	FA
1	Comprobar estado general del SAIM.	M
2	Abrir puerta del recinto de guardado.	A/M
3	Comprobar si el camino está despejado.	M
4	Iniciar movimiento del SAIM.	A
5	Acercamiento del SAIM a la posición de trabajo.	A/M
6	Posicionar SAIM en la zona de trabajo.	A/M
7	Anclar SAIM.	A
8	Anclar Rack Herramientas.	A
9	Tomar herramientas del Rack.	A
10	Trabajo sobre los espárragos.	A/M
11	Trabajo sobre las tuercas.	A/M
12	Guardado de las tuercas.	A
13	Retirar Herramientas utilizadas.	A
14	Dejar Herramientas en el rack.	A
15	Posicionar MABRIP frente a la brida.	A/M
16	Anclar MABRIP.	A
17	Retirar brida ciega con MABRIP.	A/M
18	Desanclar MABRIP.	A
19	Retirar MABRIP de la zona de trabajo.	A
20	Inicio de Tarea.	M
21	Trabajo sobre los DPC.	A/M
22	Guardado de los DPC.	A
23	Seleccionar tubo a inspeccionar.	M
24	Acercamiento de la sonda al tubo.	A
25	Relevo de datos de cada boquilla de tubo.	A
26	Relevo de datos de cada cuerpo de tubo.	A
27	Retirar la sonda de inspección.	A
28	Análisis de los datos relevados.	M
29	Inspección de la soldadura del Plenum.	A/M
30	Taponamiento de tubos.	A/M
31	Cambiar sellos de la brida.	M
32	Recambio del reel de SIES.	M
33	Desanclar rack Herramientas.	A
34	Desanclar SAIM.	A
35	Retirar SAIM de la zona de trabajo.	A

Tabla A.1: Lista de funciones en secuencia.

Tabla de verdad para definir automatismos										PREGUNTAS PARA DEFINIR AUTOMATISMO											
Orden Función	Función de Sistema	AHIF	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	P1: ¿Es obligatoria la automatización?				P2: ¿Es técnicamente posible la automatización?	P3: ¿Es obligatoria la actuación humana?			P4: ¿Es posible y razonable la actuación humana?			
										a	b	c	d	R1	R2	a	b	c	R3	R4	
										a. Ejecución difícil para el ser humano por entorno complejo: se excluye cualquier forma de participación humana porque el sistema o su entorno no respaldará la vida humana o creará productos o condiciones que la pondrían en peligro.	b. Rapidez de respuesta/limitaciones humanas: sus requisitos de rendimiento exceden o caen fuera del rango de capacidades humanas	c. Existe un requisito de la autoridad regulatoria	d. ¿Es una función de seguridad que requiere que sea automática? La implementación del automatismo de dicha función tendrá en cuenta los requerimientos de seguridad que correspondan dicha función.		Una vez determinado que la automatización es obligatoria, se debe garantizar que la automatización de las funciones es técnicamente posible.	a. Existe un requisito de la autoridad regulatoria.	b. Existen políticas o requisitos que así lo aconsejan.	c. La automatización es técnicamente imposible.		Si el resultado del punto anterior es afirmativo, es necesario confirmar que los requisitos de rendimiento están dentro de la capacidad humana. Esta decisión se toma principalmente con el asesoramiento técnico de los miembros de ingeniería de factores humanos del equipo teniendo en cuenta los criterios de la P1.	
1	Comprobar estado general del SAIM	M	No	X	Si	Si	X	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
2	Abrir puerta del recinto de guardado	A/M	No	X	No	X	Si	No	Si	No	No	No	No	No	X	No	No	No	No	No	X
3	Comprobar si el camino está despejado	M	No	X	Si	Si	X	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
4	Iniciar movimiento del SAIM	A	No	X	No	X	Si	No	No	No	No	No	No	No	X	No	No	No	No	No	X
5	Acercamiento del SAIM a la posición de trabajo	A/M	No	X	No	X	Si	No	Si	No	No	No	No	No	X	No	No	No	No	No	X
6	Posicionar SAIM en la zona de trabajo	A/M	Si	Si	No	X	X	X	Si	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
7	Anclar SAIM	A	Si	Si	No	X	X	X	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
8	Anclar Rack Herramientas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
9	Tomar herramientas del Rack	A	Si	Si	No	X	X	X	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
10	Trabajo sobre los espárragos	A/M	Si	Si	No	X	X	X	Si	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
11	Trabajo sobre las tuercas	A/M	Si	Si	No	X	X	X	Si	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
12	Guardado de las tuercas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	X
13	Retirar Herramientas utilizadas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
14	Guardar Herramientas en el Rack	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
15	Posicionar MABRIP frente a la brida	A/M	Si	Si	No	X	X	X	Si	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
16	Anclar MABRIP	A	Si	Si	No	X	X	X	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
17	Retirar Brida ciega con MABRIP	A/M	Si	Si	No	X	X	X	Si	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
18	Desanclar MABRIP	A	Si	Si	No	X	X	X	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
19	Retirar MABRIP de la zona de trabajo	A	No	X	No	X	Si	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	No	No	No	X
20	Inicio de Tarea	M	No	X	Si	Si	X	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
21	Trabajo sobre los Disp. Pérdida de Carga	A/M	Si	Si	No	X	X	X	Si	Si	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	X
22	Guardado de los DPC	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	X
23	Seleccionar tubo a inspeccionar	M	No	X	Si	Si	X	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
24	Acercamiento de la Sonda al tubo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
25	Relevo de datos de cada boquilla de tubo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
26	Relevo de datos de cada cuerpo de tubo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
27	Retirar la sonda de inspección	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
28	Análisis de los datos relevados	M	No	X	Si	Si	X	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
29	Inspección de la soldadura del Plenum	A/M	No	X	Si	Si	X	X	Si	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
30	Taponamiento de tubos	A/M	No	X	No	X	Si	No	Si	No	No	No	No	No	X	No	No	No	No	No	X
31	Cambiar sellos de la brida	M	No	X	Si	Si	X	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
32	Recambio del Reel de SIES	M	No	X	Si	Si	X	X	No	No	No	No	No	No	X	No	No	Si	Si	Si	
33	Desanclar Rack Herramientas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
34	Desanclar SAIM	A	Si	Si	No	X	X	X	No	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X
35	Retirar SAIM de la zona de trabajo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	X

Tabla A.2: Asignación Hipotética Inicial de Funciones - Parte 1.

Tabla de verdad para definir automatismos											P5: ¿Se prefiere la automatización?	P6: ¿Se prefiere la actuación humana?	7. P7: ¿Se necesita soporte automático / manual?	Observaciones	Justificación de la AHIF
Orden Función	Función de Sistema	AHIF	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R5					
										Este paso es para las funciones que no se adaptan a los criterios obligatorios, pero se prefiere la automatización de la función. Hay funciones que, aunque su cumplimiento se encuentra dentro de la capacidad de los humanos, se espera que la máquina lo realice de una mejor manera.	Identifica funciones para las cuales se prefiere el desempeño humano, porque pueden ser realizadas de manera más confiable por un humano que por automatización. Estas incluyen todas las funciones que requieren conocimientos estratégicos o un análisis a partir de premisas y flexibilidad.	Por un lado las funciones que se identificaron como automáticas son aquellas que se estima que el control debe ser automático aunque algunas de ellas pueden requerir algún soporte manual para garantizar la conciencia de la situación de la planta por parte del humano. Por otro lado las funciones identificadas como manuales son aquellas donde se estima que los requisitos de control deben controlarse manualmente, aunque algunas tareas pueden beneficiarse del soporte automático para mejorar las capacidades del operador y obtener una carga de trabajo adecuada.			
1	Comprobar estado general del SAIM	M	No	X	Si	Si	X	X	No	X	X	No		Tarea crítica para el inicio de la tarea de mantenimiento. Tareas secuenciales.	
2	Abrir puerta del recinto de guardado	AM	No	X	No	X	Si	No	Si	Si	No	Si	SM: Liberar espacio e Inspección visual durante la apertura.	Requiere inspección visual para dejar libre el camino de SAIM y evitar problemas.	
3	Comprobar si el camino está despejado	M	No	X	Si	Si	X	X	No	X	X	No		Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
4	Iniciar movimiento del SAIM	A	No	X	No	X	Si	No	Si	Si	No	No		Operación repetitiva.	
5	Acercamiento del SAIM a la posición de trabajo	AM	No	X	No	X	Si	No	Si	Si	No	Si	SM: Inspección visual.	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para continuar.	
6	Posicionar SAIM en la zona de trabajo	AM	Si	Si	No	X	X	X	Si	X	X	Si	SM: Comprobación visual de la posición correcta.	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
7	Anclar SAIM	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para continuar.	
8	Anclar Rack Herramientas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para continuar.	
9	Tomar herramientas del Rack	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
10	Trabajo sobre los espárragos	AM	Si	Si	No	X	X	X	Si	X	X	Si	SM: Comprobación visual del trabajo.	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para evitar posibles caídas de elementos.	
11	Trabajo sobre las tuercas	AM	Si	Si	No	X	X	X	Si	X	X	Si	SM: Comprobación visual del trabajo.	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para evitar posibles caídas de elementos.	
12	Guardado de las tuercas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
13	Retirar Herramientas utilizadas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
14	Guardar Herramientas en el Rack	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
15	Posicionar MABRIP frente a la brida	AM	Si	Si	No	X	X	X	Si	X	X	Si	SM: Comprobación visual de la posición correcta.	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
16	Anclar MABRIP	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para continuar.	
17	Retirar Brida ciega con MABRIP	AM	Si	Si	No	X	X	X	Si	X	X	Si	SM: Comprobación visual del retiro de la brida de manera correcta.	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
18	Desanclar MABRIP	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
19	Retirar MABRIP de la zona de trabajo	A	No	X	No	X	Si	X	No	Si	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
20	Inicio de Tarea	M	No	X	Si	Si	X	X	No	X	X	No		Mantener modelo mental del proceso de inspección y mantenimiento.	
21	Trabajo sobre los Disp. Pérdida de Carga	AM	Si	Si	No	X	X	X	Si	X	X	Si	SM: Comprobación visual del trabajo.	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para evitar posibles caídas de elementos.	
22	Guardado de los DPC	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
23	Seleccionar tubo a inspeccionar	M	No	X	Si	Si	X	X	No	X	X	No		Automatización con costo excesivo.	
24	Acercamiento de la Sonda al tubo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y de difícil acceso para un humano. Controlar dosis de radiación.	
25	Relevo de datos de cada boquilla de tubo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
26	Relevo de datos de cada cuerpo de tubo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
27	Retirar la sonda de inspección	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
28	Análisis de los datos relevados	M	No	X	Si	Si	X	X	No	X	X	No		Operación crítica para el correcto mantenimiento. Automatización con costo excesivo. Control dosis de radiación.	
29	Inspección de la soldadura del Plenum	AM	No	X	Si	Si	X	X	Si	X	X	Si	SA: Herramienta debe moverse a vel. cte. y sobre una trayectoria determinada.	Automatización para el movimiento y soporte manual para interpretar los datos.	
30	Taponamiento de tubos	AM	No	X	No	X	Si	No	Si	Si	No	Si	SA: Herramientas y colocación de los taponos.	Toma de decisiones por especialistas y la automatización completa tiene costo excesivo.	
31	Cambiar sellos de la brida	M	No	X	Si	Si	X	X	No	X	X	No		Operación crítica para el correcto mantenimiento. Automatización con costo excesivo. Control dosis de radiación.	
32	Recambio del Reel de SIES	M	No	X	Si	Si	X	X	No	X	X	No		Tarea compleja. Automatización con costo excesivo.	
33	Desanclar Rack Herramientas	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
34	Desanclar SAIM	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	
35	Retirar SAIM de la zona de trabajo	A	Si	Si	No	X	X	X	No	X	X	No		Tarea repetitiva y simple.	

Ref: SA: Soporte Automático. / SM: Soporte Manual.

Tabla A.3: Asignación Hipotética Inicial de Funciones - Parte 2.

Orden Función	Función de Sistema	AHIF	Fase 1 ¿Cumple el operador con los requisitos de ejecución clave de la función?					Fase 2 ¿Cumple el operador con los requisitos de ejecución humanos?					Fase 3 ¿Compensa económicamente?		Fase 4 ¿Es adecuado el apoyo cognitivo?				¿Asignación hipotética inicial aprobada?	Justificación				
			1.A	1.B	1.C	1.D	Observación	1	2.A	2.B	2.C	2.D	Observación	2	3.A	3	4.A	4.B			4.C	Observación	4	
			¿Tiene el operador suficiente conciencia de la situación?	¿El nivel de planificación es bajo?	¿El margen de tiempo para decidir es alto?	¿La carga de trabajo es baja?		¿El entorno de operación es seguro?	¿El nivel de estrés y fatiga es adecuado a la actividad?	¿El riesgo de fiabilidad humana es bajo o no existe?	¿El acceso a los dispositivos HMI es fácil?			¿La relación costo/beneficio es aceptable?	Observación	R. Fase 3	¿Las tareas son poco frecuentes?	¿Las tareas son simples, con un nivel adecuado de complejidad?			¿El modelo mental requerido es simple?	Observación	R. Fase 4	
1	Comprobar estado general del SAIM	M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea crítica para el inicio de la tarea de mantenimiento. Tareas secuenciales. Requiere inspección visual para dejar libre el camino de SAIM y evitar problemas.	
2	Abrir puerta del recinto de guardado	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
3	Comprobar si el camino está despejado	M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Operación repetitiva.	
4	Iniciar movimiento del SAIM	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
5	Acercamiento del SAIM a la posición de trabajo	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Operación repetitiva.	
6	Posicionar SAIM en la zona de trabajo	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
7	Anclar SAIM	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para continuar.	
8	Anclar Rack Herramientas	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para continuar.	
9	Tomar herramientas del Rack	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.	
10	Trabajo sobre los espárragos	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para evitar posibles caídas de elementos.	
11	Trabajo sobre las tuercas	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para evitar posibles caídas de elementos.	
12	Guardado de las tuercas	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.	
13	Retirar Herramientas utilizadas	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.	
14	Guardar Herramientas en el Rack	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.	
15	Posicionar MABRIP frente a la brida	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
16	Anclar MABRIP	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva, y se requiere comprobación visual para continuar.	
17	Retirar Brida ciega con MABRIP	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea sencilla de inspección visual. Automatización con costo excesivo.	
18	Desanclar MABRIP	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.	
19	Retirar MABRIP de la zona de trabajo	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.	
20	Inicio de Tarea	M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Mantener modelo mental del proceso de inspección y mantenimiento.	
21	Trabajo sobre los Disp. Pérdida de Carga	A/M	Si	Si	X	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.	
22	Guardado de los DPC	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.
23	Seleccionar tubo a inspeccionar	M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Automatización con costo excesivo.
24	Acercamiento de la Sonda al tubo	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y de difícil acceso para un humano. Controlar dosis de radiación.
25	Relevo de datos de cada boquilla de tubo	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.
26	Relevo de datos de cada cuerpo de tubo	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.
27	Retirar la sonda de inspección	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.
28	Análisis de los datos relevados	M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Operación crítica para el correcto mantenimiento. Automatización con costo excesivo. Control dosis de radiación.
29	Inspección de la soldadura del Plenum	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Automatización para el movimiento y soporte manual para interpretar los datos.
30	Taponamiento de tubos	A/M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Toma de decisiones por especialistas y la automatización completa tiene costo excesivo.
31	Cambiar sellos de la brida	M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Operación crítica para el correcto mantenimiento. Automatización con costo excesivo. Control dosis de radiación.
32	Recambio del Reel de SIES	M	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Tarea compleja. Automatización con costo excesivo.
33	Desanclar Rack Herramientas	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.
34	Desanclar SAIM	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.
35	Retirar SAIM de la zona de trabajo	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	X	X	X	X	X	Si	Si	Si	Tarea repetitiva y simple.

Tabla A.4: Tabla de Fase Evaluativa.

Orden Función	Función de Sistema	AHIF	Requisito de control	Resultado de la asignación hipotética inicial		Observaciones	Carga en área central de procesamiento				Total	Observaciones IFH	
				Acciones de control automáticas	Acciones de control humanas		Consciencia de la situación	Planificación	Decisión	Ejecución			
			Parámetros a controlar										
1	Comprobar estado general del SAIM	M	Estado del SAIM (Hardware y software)	Rutina de prueba del manipulador	Inspección visual		3	1	1	1	6		
2	Abrir puerta del recinto de guardado	AIM	Posición de la puerta	Apertura de las puertas	Inspección visual		1	1	1	1	4		
3	Comprobar si el camino está despejado	M	Estado de las vías lineales		Inspección visual		3	1	1	1	6		
4	Iniciar movimiento del SAIM	A	Posición y velocidad del SAIM	Control de los motores eléctricos			3	0	0	0	3		
5	Acercamiento del SAIM a la posición de trabajo	AIM	Posición del SAIM	Ubicación del SAIM	Inspección visual		1	1	3	1	6		
			Velocidad del SAIM	Movimiento del SAIM	Inspección visual		1	0	0	0	1		
6	Posicionar SAIM en la zona de trabajo	AIM	Posición SAIM	Movimiento del SAIM	Inspección visual		1	1	1	1	4		
7	Anclar SAIM	A	Posición SAIM	Movimiento del sistema de anclaje			1	0	0	0	1		
8	Anclar Rack Herramientas	A	Posición Rack de Herramientas	Movimiento del sistema de anclaje			1	0	0	0	1		
9	Tomar herramientas del Rack	A	Herramienta a utilizar	Tomar herramienta			1	0	0	0	1		
			Ubicación de la herramienta	Movimiento de Brazo robótico			0	0	0	0	0	0	
10	Trabajo sobre los espárragos	AIM	Ubicación de la herramienta	Movimiento de Brazo robótico			0	0	0	0	0		
			Activar/Desactivar tensionador	Tensionador hidráulico			0	0	0	0	0	0	
			Posición de la herramienta	Movimiento de Brazo robótico	Inspección visual		3	1	1	1	1	6	
11	Trabajo sobre las tuercas	AIM	Activar herramienta	Accionamiento de máquina para trabajar sobre tuercas			1	0	0	1	2		
			Enrosca/Desenrosque				1	0	0	0	1	2	
			Posición de la tuerca y en el esparrago	Sensores L y H de posición de tuercas.			1	0	0	0	1	2	
12	Guardado de las tuercas	A	Posición de herramientas	Movimiento de Brazo robótico			1	0	0	0	1		
14	Guardar Herramientas en el Rack	A	Ubicación de la herramienta	Movimiento de Brazo robótico			1	0	0	0	1		
15	Posicionar MABRIP frente a la brida	AIM	Posición MABRIP	Movimiento del MABRIP	Inspección visual		1	1	1	1	4		
16	Anclar MABRIP	A	Posición MABRIP	Movimiento del sistema de anclaje			1	0	0	0	1		
17	Retirar Brida ciega con MABRIP	AIM	Posición del manipulador	Movimiento del MABRIP	Inspección visual		1	1	1	1	4		
			Esfuerzos de motores del manipulador		Inspección visual		1	0	0	0	1		
18	Desanclar MABRIP	A	Posición MABRIP	Movimiento del sistema de anclaje			1	0	0	0	1		
19	Retirar MABRIP de la zona de trabajo	A	Posición MABRIP	Movimiento del MABRIP			1	0	0	0	1		
20	Inicio de Tarea	M	Disponibilidad para comenzar la siguiente tarea		Inspección visual		5	1	3	1	10	Por ser una planta prototipo.	
21	Trabajo sobre los Disp. Pérdida de Carga	AIM	Posición de los DPC	Posición del brazo robótico			1	1	1	1	4		
				Acople entre elementos	Inspección visual		3	1	1	1	6		
22	Guardado de los DPC	A	Posición de los DPC	Posición del brazo robótico			1	0	0	1	2		
			Datos relevados por la sonda	Guardar datos relevados	Análisis de datos		3	1	3	1	8		
23	Seleccionar tubo a inspeccionar	M			Elección de tubo		1	0	0	1	2	Selección acorde a protocolos.	
			Posición del SAIM	Ubicación del SAIM	Inspección visual		1	1	3	1	6		
24	Acercamiento de la Sonda al tubo	A	Velocidad del SAIM	Movimiento del SAIM	Inspección visual		1	0	0	0	1		
			Variables a medir según END	Guardar datos relevados			1	0	0	0	1		
25	Relevo de datos de cada boquilla de tubo	A	Posición de la sonda	Presentar datos en gráficos	Inspección visual		1	0	0	0	1		
			Esfuerzos para mover la sonda	Presentar datos en gráficos	Inspección visual		1	0	0	0	1		
			Variables a medir según END	Guardar datos relevados			3	0	0	0	3		
26	Relevo de datos de cada cuerpo de tubo	A	Posición de la sonda	Presentar datos en gráficos	Inspección visual		1	0	0	0	1		
			Esfuerzos para mover la sonda	Presentar datos en gráficos	Inspección visual		1	0	0	0	1		
27	Retirar la sonda de inspección	A	Posición de la sonda	Movimiento de Brazo robótico			1	0	0	0	1		
28	Análisis de los datos relevados	M	Variables a determinar según indiquen los especialistas END		Estudio de los datos por especialistas -END	Tarea realizada por personal externo al área de mantenimiento	3	1	1	1	6	Tiempo de análisis alto - Tarea externa al área de Mantenimiento.	
29	Inspección de la soldadura del Plenum	AIM	Pos y vel del cabezal de inspección	Movimiento del cabezal de inspección	Inspección visual durante la revisión		5	1	3	1	10		
30	Taponamiento de tubos	AIM	Posición del tapón	Movimiento de Brazo robótico			1	5	3	1	10		
31	Cambiar sellos de la brida	M	Estado de los sellos de la brida		Cambio de sellos de la brida manualmente		1	3	1	5	10	1 operador mecánico + 1 operador de seguridad.	
32	Recambio del Reel de SIES	M	Estado del Reel del SIES		Cambio de Reel manualmente		3	3	3	5	14	1 operador + 1 operador de seguridad.	
33	Desanclar Rack Herramientas	A	Posición Rack de Herramientas	Movimiento del sistema de anclaje			1	0	0	0	1		
34	Desanclar SAIM	A	Posición SAIM	Movimiento del sistema de anclaje			1	0	0	0	1		
35	Retirar SAIM de la zona de trabajo	A	Posición SAIM	Movimiento del SAIM			1	0	0	0	1		

Tabla A.5: Tabla de Acciones y Requisitos de control y la Carga de Trabajo.

		Carga de trabajo: NASA-TLX							
Orden Función	Función de Sistema/ Tarea	AHI F	Exigencia Mental (M)	Exigencia Física (F)	Exigencia Temporal (T)	Esfuerzo (E)	Rendimiento (R)	Frustración (Fr)	Media Ponderada de la Función
1	Comprobar estado general del SAIM	M							
	Inspección visual del SAIM		10	7	7	10	5	0	33.33
	Prueba de actuadores y motores		5	10	15	10	10	3	46.33
	Prueba de software		15	0	10	5	3	3	40.67
	Prueba de las herramientas		5	10	15	5	3	3	39.00
	Prueba del MABRIP		5	5	10	10	3	1	33.67
3	Comprobar si el camino está despejado	M							
	Revisar el camino hasta el recinto del reactor		5	5	10	5	0	0	26.67
	Revisar el camino dentro del recinto del reactor		5	10	15	10	0	3	43.00
19	Inicio de Tarea	M							
	Dar confirmación en base a inspección visual de lo ocurrido		3	3	10	5	5	0	26.33
20	Seleccionar tubo a inspeccionar	M							
	Interpretar instrucciones para el orden de en que se revisan cada tubo		12	0	15	7	5	5	50.67
	Accionar el brazo robótico para cumplir la secuenciación		5	0	10	5	0	0	26.67
25	Análisis de los datos relevados	M							
	Recolectar datos de cada tubo		10	5	15	5	5	5	46.67
	Comparar frente a datos patrón		15	0	10	10	5	5	48.33
	Determinar si es necesario tomar acciones correctivas		20	0	0	5	5	0	26.67
28	Cambiar sellos de la brida	M							
	Retirar sellos utilizados		3	15	20	15	5	7	60.00
	Comprobar integridad del asiento del sello		10	10	5	10	3	7	36.33
	Colocar sello nuevo.		5	17	12	12	5	7	45.67
	Preparar brida ciega para su recolocación		5	15	12	15	3	5	46.00
29	Recambio del Reel de SIES	M							
	Retirar el reel a cambiar		5	17	15	7	3	3	41.00
	Comprobar intergridad de la máquina del reel		7	10	10	10	5	5	40.33
	Colocar el nuevo reel en la máquina		5	17	15	12	3	3	46.00
	Preparar la máquina para su siguiente uso		7	10	10	10	1	0	34.00

Tabla A.6: V&V: Tabla NASA-TLX para las funciones manuales.

Consciencia de la situación: SART																
Orden Función	Función de Sistema/ Tarea	AHIF	Demanda de atención				Disponibilidad de atención					Comprensión de la situación				SA Resultado
			Inestabilidad de la situación	Variabilidad de la situación	Complejidad de la situación	Subtotal	Preparación	Capacidad mental disponible	Concentración	División de la atención	Subtotal	Cantidad de información	Calidad de la información	Familiaridad	Subtotal	
1	Comprobar estado general del SAIM	M														
	Inspección visual del SAIM		1	3	2	6	7	6	6	7	26	7	6	7	20	40
	Prueba de actuadores y motores		4	4	7	15	7	6	6	6	25	6	5	6	17	27
	Prueba de software		1	1	4	6	7	5	5	6	23	7	7	5	19	36
	Prueba de las herramientas		4	4	4	12	7	6	6	6	25	6	5	6	17	30
	Prueba del MABRIP		3	3	2	8	7	5	5	5	22	6	5	5	16	30
3	Comprobar si el camino está despejado	M														
	Revisar el camino hasta el recinto del reactor		1	6	1	8	7	4	3	5	19	7	6	7	20	31
	Revisar el camino dentro del recinto del reactor		3	4	3	10	7	4	5	7	23	5	6	5	16	29
19	Inicio de Tarea	M														
	Dar confirmación en base a inspección visual de lo ocurrido		1	2	2	5	6	6	5	2	19	7	7	7	21	35
20	Seleccionar tubo a inspeccionar	M														
	Interpretar instrucciones para el orden de en que se revisan cada tubo		3	4	5	12	7	7	6	6	26	7	7	6	20	34
	Accionar el brazo robótico para cumplir la secuenciación		3	2	1	6	5	6	6	6	23	5	7	7	19	36
25	Análisis de los datos relevados	M														
	Recolectar datos de cada tubo		1	1	5	7	7	6	6	6	25	5	5	7	17	35
	Comparar frente a datos patrón		1	5	5	11	7	7	7	6	27	7	7	7	21	37
	Determinar si es necesario tomar acciones correctivas		1	3	7	11	7	7	7	6	27	7	7	6	20	36
28	Cambiar sellos de la brida	M														
	Retirar sellos utilizados		5	3	7	15	7	6	6	4	23	5	7	5	17	25
	Comprobar integridad del asiento del sello		1	3	3	7	7	5	6	4	22	7	5	5	17	32
	Colocar sello nuevo.		1	5	5	11	7	6	6	5	24	7	7	7	21	34
	Preparar brida ciega para su recolocación		5	3	3	11	7	5	6	4	22	7	7	5	19	30
29	Recambio del Reel de SIES	M														
	Retirar el reel a cambiar		5	3	5	13	6	6	5	5	22	7	7	5	19	28
	Comprobar integridad de la máquina del reel		1	5	4	10	7	6	6	5	24	7	7	5	19	33
	Colocar el nuevo reel en la máquina		3	4	6	13	7	6	5	4	22	7	7	5	19	28
	Preparar la máquina para su siguiente uso		2	2	4	8	6	6	5	4	21	7	7	5	19	32

Tabla A.7: V&V: Tabla SART para las funciones manuales.

Bibliografía

- [1] Maness, C. R. Three Mile Island: The Most Studied Nuclear Accident in History. *Science*, **204** (4395), 795, 1979. URL <https://www.gao.gov/assets/emd-80-109.pdf>. 1
- [2] O'Hara, J., Higgins, J., Fleger, S., Pieringer, P. Nureg 0711 - Human factors engineering program review model. *Design*, 2012. URL <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA488603>. 1, 6, 41
- [3] Overbey, C., Jenkins, J., Price, H., Pulliman, R. NUREG/CR-3331 - A methodology for allocating nuclear power plant control functions to human or automatic control. *Trans. Am. Nucl. Soc.; (United States)*, **45** (June), 1983. URL <https://www.osti.gov/biblio/5836278>. 1, 7, 10, 17
- [4] Area Robótica y Automatización - CAREM 25. Presentación: Sistema de Inspección y Mantenimiento de los GVs, 2020. 3
- [5] Acha, L. ER-CAREM25J-4-r0 : Sistema de Inspección y Mantenimiento de los GVs. pág. 1, 2020. URL <http://www.cnea.gov.ar/carem>. 3
- [6] Scanlon, M. C., Karsh, B. T., Densmore, E. M. Human Factors Engineering and Patient Safety. *Pediatric Clinics of North America*, **53** (6), 1105–1119, 2006. URL <http://qualitysafety.bmj.com/>. 5
- [7] Chapanis, A., Holstein, W. K. Human-factors engineering. *Human-factors engineering*, **Publisher:**, 1–8. URL <https://www.britannica.com/topic/human-factors-engineering>. 5
- [8] Hugo, J. V., Gertman, D., Joe, J. C., Medema, H., Whaley, A., Farris, R. Development of a Technical Basis for Advanced SMR Function Allocation. (September), 2013. 7
- [9] RGBSI. Explanation of the 6 levels of Driving Automation, 2020. URL <https://blog.rgsbi.com/6-levels-of-driving-automation>. 9

- [10] Joe, J. C., O'Hara, J., Hugo, J. V., Oxstrand, J. H. Function Allocation for Humans and Automation in the Context of Team Dynamics. *Procedia Manufacturing*, **3** (Ahfe), 1225–1232, 2015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.204>. 10
- [11] Green, M., Collier, S. Verification and Validation of Human Factors Issues in Control Room Design and Upgrades. (December), 1999. 12
- [12] Flury, C. A., Nowakowski, M. P. PLN-CAREM25IH-13-r0 : Plan de Implementación para la Verificación y Validación de Ingeniería de Factores Humanos de la Planta CAREM 25, págs. 16–21. 2022. 13
- [13] Hart, S. G., Staveland, L. E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. **3**, 103–111, 1988. 14
- [14] De Arquer, C., Nogareda, I. NTP 544: Estimación de la carga mental de trabajo: el método NASA TLX. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 1999. 14, 25
- [15] Taylor, R. M. Situation Awareness Rating Technique (SART). *AGARD Conference Proceedings-478*, (1990), 1–8, 1990. URL <https://skybrary.aero/articles/situation-awareness-rating-technique-sart>. 15
- [16] Taylor, R. M. Situation Awareness Rating Technique(SART). (Chapter 3), 904–908, 2006. URL <https://ext.eurocontrol.int/ehp/?q=node/1608>. 15, 27
- [17] McCoy, J. W. Behaviorally Anchored Rating Scale: A Full Guide with Examples. *Aihr*, págs. 1–18, 2020. URL <https://www.aihr.com/blog/behaviorally-anchored-rating-scale/>. 16, 28
- [18] SCHWAB, D. P., HENEMAN III, H. G., DeCOTIIS, T. A. Behaviorally anchored rating scales: A review of the literature. *Personnel Psychology*, **28** (4), 549–562, 1975. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01392.x>. 16
- [19] Flury, C. A., Suarez, M. F., Tacca, E. A. PO-CAREM25IH-3-B0050-r0 Procedimiento para la Asignación Hipotética Inicial del Nivel de Automatización de Funciones, 2021. 17, 22
- [20] Flury, C. A., Tacca, E. A. PO-CAREM25IH-5-B0050-r0 - Procedimiento para la evaluación de la Asignación Hipotética Inicial de funciones, 2021. 21
- [21] Okrent, D., Abbott, E. C., Leonard, J. D., Xiong, Y. BARS for deep technical Knowledge, 1993. 28

- [22] Acha, L. ER-CAREM25J-5-B6105-r0 Proyecto CAREM: Celda robotizada del SAIM, 2021. [31](#)

