

METODOLOGÍA MeiA

INNOVACIÓN EN EL DESARROLLO DE SOFTWARE DE CONTROL
PARA SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AUTOMATIZADOS

MARÍA ISABEL SARACHAGA GONZÁLEZ
MARÍA LUZ ÁLVAREZ GUTIÉRREZ
NAGORE IRIONDO URBISTAZU
ARANTZAZU BURGOS FERNÁNDEZ
AINTZANE ARMENTIA DÍAZ DE TUESTA
OSKAR CASQUERO OYARZABAL
EKAITZ HURTADO PANDO

CIP. Biblioteca Universitaria

Metodología MeiA [Recurso electrónico]: innovación en el desarrollo de software de control para sistemas de producción automatizados/ [autores, María Isabel Sarachaga González ...(*et al.*)]. – Datos. – [Leioa]: Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea, Argitalpen Zerbitzua = Servicio Editorial, [2026]. – 1 recurso en línea: PDF (115 p.)

Modo de acceso: World Wide Web.

ISBN: 978-84-1319-749-4

1. Control automático. 2. Fabricación – Control. 3. Automatización. 4. Ingeniería de programas y sistemas de programación. I. Sarachaga González, María Isabel, coaut.

(0.034)681.5

Autores:

María Isabel Sarachaga González

María Luz Álvarez Gutiérrez

Nagore Iriondo Urbistazu

Arantzazu Burgos Fernández

Aintzane Armentia Díaz de Tuesta

Oskar Casquero Oyarzabal

Ekaitz Hurtado Pando

© Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua

Argitalpen Zerbitzua · Servicio Editorial
editorial@ehu.eus - 94 601 2227

www.ehu.eus/argitalpenak
Edificio Biblioteca, 1.ª planta
B.º Sarriena s/n. Campus de Bizkaia

ISBN: 978-84-1319-749-4

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido apoyo del proyecto **ELKARTEK KK-2025/00035**.

Índice

Capítulo 1. Introducción.	6
Capítulo 2. Metodología MeiA.	9
Capítulo 3. Caso de estudio: desarrollo del sistema de control de la célula de montaje flexible DISA FMS-200.	16
Capítulo 4. Desarrollo de un componente MeiA para una unidad de trabajo	22
4.1. Análisis del componente MeiA.	22
Organización del arranque y parada del modo automático (Fase I)	23
Entidades equipo que realizan las operaciones de producción (Fase VI)	28
Organización del arranque y parada de la emergencia (Fase V)	35
Organización del arranque y parada del modo manual (Fase II-opcional)	39
Gestión de los posibles fallos que pueden ocurrir (Fase IV-opcional)	42
4.2. Diseño de la arquitectura del componente MeiA.	46
4.3. Diseño detallado del componente MeiA	47
Diseño detallado de las DOU	48
Diseño detallado del modelo del sistema de control	55
Diseño detallado del modelo de integración	58
Diseño detallado del gemelo funcional	58
4.4. Implementación de un componente MeiA	59
Creación de la tabla de variables globales	60
Definición de la interfaz del FB del componente MeiA	61
Implementación de un FB por cada DOU diseñado	63
Implementación de un FB para el gemelo funcional	63
Implementación del cuerpo del FB del componente MeiA.	64
4.5. Pruebas del componente MeiA	66
Pruebas unitarias.	67
Pruebas de integración	68
Pruebas de verificación y validación	69

Capítulo 5. Desarrollo de un componente MeiA para el control de célula	70
5.1. Análisis del componente MeiA	71
Organización del arranque y parada del modo automático (Fase I)	71
Establecimiento de las operaciones de producción (Fase VI)	72
Organización del arranque y parada de la emergencia (Fase V).	74
5.2. Diseño de la arquitectura del componente MeiA	78
5.3. Diseño detallado del componente MeiA	78
Diseño detallado de las DOU	79
Diseño detallado del modelo del sistema de control	88
Diseño detallado del modelo de integración	88
Diseño detallado de los gemelos funcionales de los componentes MeiA de unidades de trabajo	88
5.4. Implementación del componente MeiA	90
Definición de la interfaz del FB del componente MeiA	91
Implementación de un FB por cada DOU diseñado	92
Implementación del cuerpo del FB del componente MeiA.	93
Implementación de los gemelos funcionales de los componentes de las unidades	94
5.5. Pruebas del componente MeiA	96
Capítulo 6. Conclusiones	97
Capítulo 7. Referencias	99
ANEXO. Fases de análisis de la metodología MeiA	101
Fase I: Secuencia principal-Modo automático	102
Fase II: Modo manual.	104
Fase III: Modos de pruebas	106
Fase IV: Fallos	108
Fase V: Paro de emergencia.	111
Fase VI: Producción normal	113

Capítulo 1

Introducción

Los retos actuales y futuros de los sistemas de producción automatizados están alineados con la transformación digital, la sostenibilidad y la integración tecnológica que garantice la interoperabilidad global, incluso con los sistemas heredados. La tendencia apunta hacia sistemas más inteligentes, flexibles y adaptables, que maximicen la disponibilidad de los equipos proporcionando máximos ratios de una producción personalizada de productos de alta calidad. Afrontar estos retos supone un incremento notable en el grado de complejidad del software que controla el trabajo coordinado de un conjunto de máquinas y equipos (robots, máquinas CNC, sistemas de transporte, almacenes, etc.), gestiona el procesamiento distribuido de datos y flujo automático de materiales, y se conecta con otros sistemas para proporcionar una interoperabilidad tanto horizontal como vertical con los niveles superiores de toma de decisiones de la empresa.

El Controlador Lógico Programable (PLC) es el elemento clave para llevar a cabo el control de estos sistemas automatizados que junto con los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) gestionan la lógica y supervisión del proceso. Además, las HMI (Human Machine Interfaz) facilitan la interacción entre el personal de planta y los equipos, y los sistemas de seguridad garantizan la protección de personas y equipamiento.

El desarrollo del software de control es un proceso complejo que requiere directrices de desarrollo y gestión de la información para garantizar una integración exitosa de las tecnologías de la información con las tecnologías de operación del entorno industrial, con objeto de transformar información en acciones de dispositivos de un modo controlado.

En respuesta a esta necesidad surge la versión actualizada de la metodología MeiA (Methodology for industrial Automation systems) concebida para desarrollar y documentar software de control que afronte los retos actuales y futuros de los sistemas de producción automatizados. Esta metodología combina las mejores prácticas de la ingeniería de software con

los métodos y estándares consolidados en el ámbito de la ingeniería de automatización, e incorpora los estándares que fomentan los modelos de referencia para la digitalización de estos sistemas. Así, un sistema automatizado se configura como un conjunto de unidades de trabajo (conforme al modelo físico del estándar IEC 61512 [1]), y MeiA estructura su software de control en un conjunto de unidades de control encapsuladas (componentes MeiA) que cooperan (según la norma IEC 62832-1:2020 [2] para la digitalización de los sistemas de producción), e interoperan con las aplicaciones empresariales de toma de decisiones (de acuerdo con la norma IEC 62264 [3]).

La arquitectura de estos componentes consta del Modelo de Integración (MI) que organiza el estado de la entidad controlada y sus conexiones con el entorno, el Modelo del Sistema de Control (MSC) que contiene el estado de su software de control, y los procedimientos que actualizan u obtienen información de ambos modelos al ejecutar las operaciones de control. No obstante, el componente MeiA se alinea conceptualmente con los componentes de los modelos de referencia más utilizados: los sistemas ciberfísicos (CPS) [4] de la arquitectura de referencia para fabricación inteligente [5] del NIST (National Institute of Standards and Technology), el componente I4.0 de RAMI 4.0 (Reference Architecture Model for Industry 4.0) [6] y el componente IIoT (Industrial Internet of Things) de IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) [7].

Los componentes MeiA interactúan a través de interfaces que abstraen la complejidad de su implementación, la cual se realiza conforme al estándar IEC 61131-3 [8]. Este estándar proporciona un modelo para organizar el software de control en un proyecto de automatización que se ejecutará en un PLC. El modelo consta de una configuración que define el hardware (PLC y módulos de entrada/salida), la cual contiene uno o más recursos que corresponden a cada CPU o unidad de procesamiento disponible. En un recurso pueden estar definidas una o varias tareas que permiten la ejecución periódica o activada por evento de un grupo de unidades de organización de programa (POU-Program Organization Unit). Las POU pueden ser de tipo función, bloque funcional (FB-Function Block) o programa. Las funciones realizan operaciones específicas y devuelven un valor, pero no conservan memoria interna. Los FB son módulos de control reutilizables que encapsulan datos e instrucciones y guardan los valores de las variables. Los programas contienen la lógica principal del control y se ejecutan dentro de las tareas. Además, las variables globales y locales permiten el intercambio de datos entre programas, bloques y el hardware, asegurando la correcta comunicación dentro del sistema. El estándar también propone lenguajes de programación tanto textuales (ST-Structured Text e IL-Instruction List) como gráficos (LD-Ladder Diagram, FBD-Function Block Diagram, y SFC-Sequential Function Chart) para realizar la implementación del componente MeiA y del módulo software que simula el comportamiento de la entidad controlada (denominado Gemelo Funcional-GF) [9] usado para la validación del componente.

La metodología MeiA aborda los aspectos operativos y de ingeniería para hacer frente tanto a los requisitos funcionales necesarios para gestionar la producción normal y los fallos de hardware, como a los requisitos no funcionales relacionados con la flexibilidad, extensibilidad, seguridad y mantenibilidad del software desarrollado. Además, dispone de infraestructura de soporte con directrices, plantillas y herramientas que utilizan la terminología del dominio para mejorar la comunicación entre todos los actores implicados en el desarrollo, la configuración y el funcionamiento del sistema. Las plantillas se personalizan para el sistema automa-

tizado concreto, fomentando la reutilización desde las primeras fases de desarrollo y proporcionando documentación para el mantenimiento y posibles cambios futuros en los requisitos de un software que evoluciona a lo largo de décadas. Las herramientas permiten crear los modelos necesarios para construir y documentar los componentes MeiA, y generar su código conforme al estándar IEC 61131-3.

Todos estos aspectos se detallan en los siguientes apartados del documento. En el apartado 2 se describen las cuatro fases del ciclo de desarrollo del software de control para sistemas de producción automatizados que propone la metodología MeiA. En el apartado 3 se aplica dicha metodología para desarrollar el software de control de la célula de montaje flexible DISA FMS-200, el cual comprende seis componentes interoperando para alcanzar los objetivos de control según una estrategia jerárquica. Concretamente, se han desarrollado cinco componentes MeiA para cinco unidades de trabajo y un componente MeiA para el control general. El apartado 4 detalla los cinco pasos de construcción de un componente MeiA para una unidad de trabajo usando como ejemplo una de las unidades del caso de estudio, mientras que el apartado 5 destaca las peculiaridades a considerar en dichos pasos cuando se construye el componente para el control general. Por último, el artículo finaliza con el apartado 6 de conclusiones y el anexo que describe los pasos de las fases de análisis con detalle.

Capítulo 2

Metodología MeiA

La metodología MeiA concibe el sistema de control de un sistema de producción automatizado como un conjunto de componentes MeiA que interactúan con objeto de alcanzar los objetivos de producción, pese a situaciones de fallo, y proporcionar integración con los niveles superiores de toma de decisiones de una empresa.

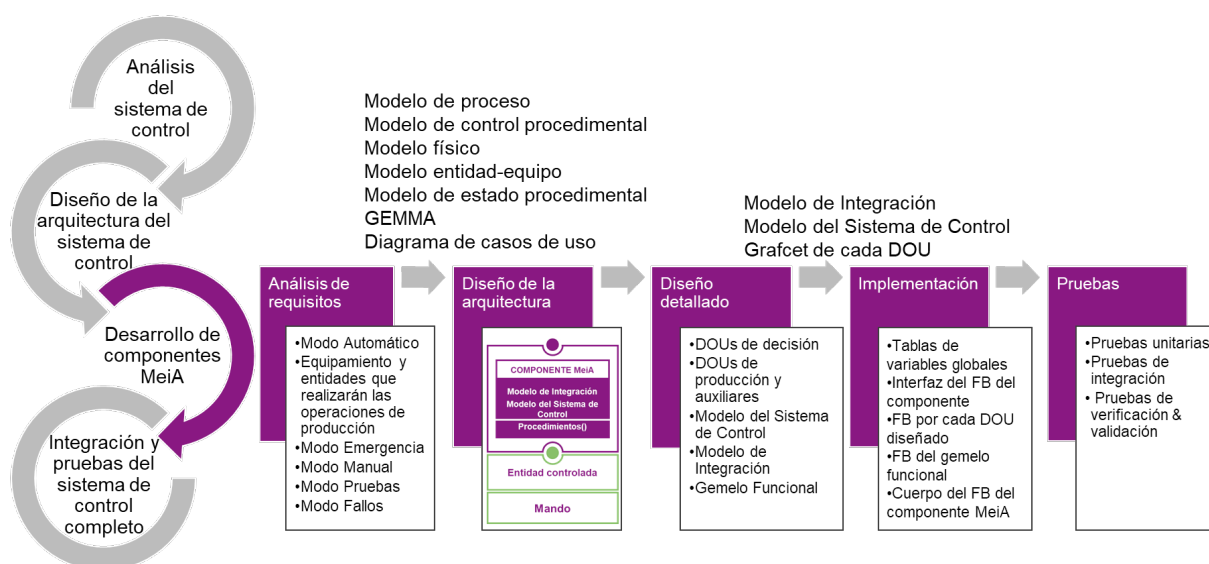


Figura 1

Metodología de desarrollo del software de control para un sistema de producción

La metodología de desarrollo se presenta en la figura 1. Por una parte, los círculos verticales a la izquierda identifican las cuatro fases del ciclo de desarrollo del software de control para

un sistema de producción automatizado: el análisis del sistema de control para identificar su propósito y objetivos, su diseño arquitectónico que determina los componentes MeiA, su desarrollo y, por último, la integración de estos componentes y las pruebas de todo el sistema de control.

Fase 1. Análisis del sistema de control

El análisis parte de los requisitos de usuario/a que deben contemplar la descripción de los siguientes aspectos: 1) el funcionamiento y las operaciones del sistema de producción automatizado incluyendo el objetivo (qué hace), las operaciones que permiten alcanzar el objetivo (de qué forma), considerando tanto los requisitos funcionales como los no funcionales (restricciones de tiempos, prioridades, etc.) y el orden en que se deben realizar las operaciones; 2) los modos de operación (automático, manual, pruebas, fallo, emergencia); 3) las condiciones de arranque; 4) la información que procesará el sistema de supervisión referente al sistema de producción, a su trazabilidad y a los controles a realizar sobre el mismo; 5) todas las señales, tanto señales asociadas a los sensores y a los actuadores del sistema de producción, como señales de monitorización y control procedentes de sistemas que interactúan con dicho sistema (HMI, servidor web, cliente OPC-UA, etc.).

La descripción detallada del sistema de producción permite identificar las acciones que pueden ser solicitadas por los diferentes actores que interactúan con el sistema, con especial atención a los modos de funcionamiento en los que puede operar y el conjunto de componentes MeiA que constituirán el sistema de control.

Fase 2. Diseño de arquitectura del sistema de control

El diseño arquitectónico del sistema de control depende de la estrategia de control. Para un control jerárquico, la arquitectura comprende tantos componentes MeiA como unidades de trabajo se identifiquen en el sistema de producción, los cuales encapsularán el sistema de control de cada una de ellas, más un componente adicional para el control general. En dicha arquitectura también se representan las relaciones internas entre estos componentes, así como las relaciones externas con otros procesos de gestión de la empresa. Todas estas relaciones se realizarán a través de los interfaces correspondientes.

Fase 3. Desarrollo de los componentes MeiA

Esta tercera fase consiste en desarrollar los componentes MeiA identificados en el diseño arquitectónico. Partiendo de los requisitos de funcionamiento de un componente, el ciclo de desarrollo para su construcción adopta el modelo en V (figura 2). Este modelo establece la secuencia de los procesos, propuestos en el estándar ISO/IEC/IEEE 12207 «Procesos del ciclo de vida del software» [10], que guían la transformación de los requisitos de un componente en un proyecto de automatización con diferentes modos de mando e interconexión con otros componentes. El proyecto de automatización se implementa de acuerdo con la norma IEC 61131-3.

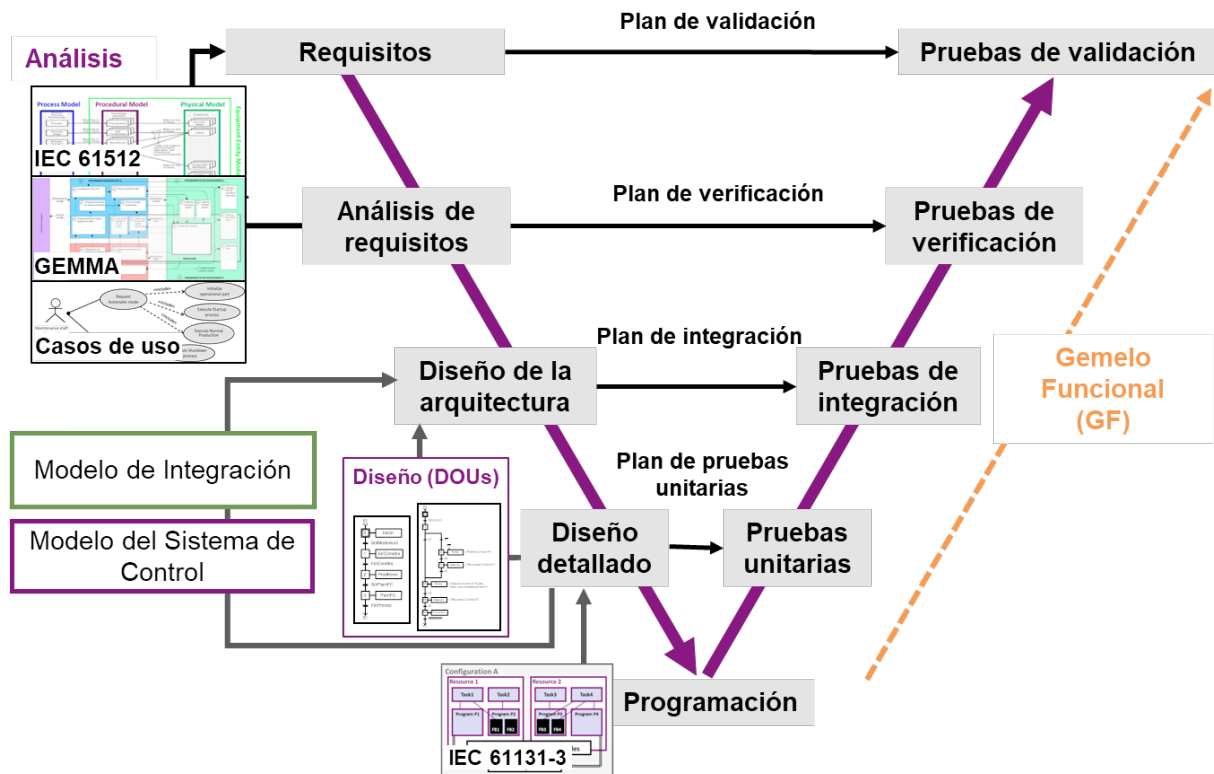


Figura 2

Modelo de desarrollo de un componente MeiA

Esta fase también puede incluir la construcción del gemelo funcional (GF) para realizar las pruebas del software de control. Dado que un gemelo funcional es un modelo digital que simula el comportamiento de la entidad controlada, se distinguen dos tipos: el gemelo funcional de una unidad de trabajo y el gemelo funcional de un componente MeiA que controla una unidad de trabajo. El primero responde a las acciones del software de control (entradas de la unidad) con la generación de señales de los sensores que simulan las salidas de la unidad. El segundo simula las operaciones de decisión, producción y auxiliares que debe realizar la unidad.

Fase 4. Integración de componentes MeiA y pruebas del sistema de control

Una vez validados todos los componentes MeiA de las unidades de trabajo, la integración de estos componentes se lleva a cabo de forma escalonada a través de las pruebas del componente MeiA del control general.

Cabe señalar que, al igual que los componentes de las unidades pueden trabajar con la unidad de trabajo real o con el gemelo funcional de la unidad, el componente MeiA del control general puede trabajar con los componentes MeiA de las unidades o con los gemelos funcionales de estos componentes.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el procedimiento de pruebas es el siguiente:

1. Probar el componente del control general incluyendo los gemelos funcionales de los componentes de forma escalonada.
2. Sustituir, de forma gradual, los gemelos funcionales de los componentes por los componentes que controlan los gemelos de las unidades.
3. Conmutar progresivamente los componentes de las unidades para operar con la unidad de trabajo real.

Este enfoque permite tanto realizar la integración de los componentes como probar el sistema de control completo.

Por otra parte, los cuadrados horizontales de la figura 1, que expanden la Fase 3 de desarrollo de los componentes MeiA, identifican los cinco pasos para el desarrollo de cada uno de ellos: análisis de los modos de funcionamiento del componente, diseño arquitectónico acorde a la arquitectura de un componente, diseño detallado de los procedimientos y modelos identificados en su arquitectura, implementación del componente en un proyecto de automatización y pruebas de dicho componente.

Paso 1. Análisis del componente MeiA

El análisis de un componente a través de sus modos de funcionamiento [11] proporciona siete modelos (Tabla 1). Los modos de funcionamiento determinan las fases de la metodología MeiA que guiarán el análisis utilizando la terminología del dominio. También ayudan a identificar las necesidades de supervisión y control, así como a configurar el panel de operación y otros paneles auxiliares. Concretamente, la Fase I establece la secuencia principal para el modo de funcionamiento automático. Las Fases II y III organizan el arranque y la parada en los modos de funcionamiento manual y pruebas, respectivamente. La Fase IV identifica, analiza y evalúa los fallos que pueden producirse en el proceso. La Fase V organiza el arranque y la parada del modo de funcionamiento emergencia. Por último, la fase VI establece el ciclo normal de producción.

El análisis de cada fase se lleva a cabo mediante una secuencia ordenada de pasos (ver ANEXO) que permitirán la personalización de las plantillas para los distintos modelos asociados a cada fase. Por lo tanto, los modelos completos del componente se derivarán de forma incremental a partir de los modelos obtenidos en cada fase. Estos modelos incluyen los propuestos por la norma IEC 61512 de la arquitectura de referencia RAMI 4.0, la guía GEMMA [12] y los diagramas de casos de uso.

Tabla 1

Modelos para la construcción y documentación de un componente MeiA

Modelo	Información que organiza
Modelo de proceso	Las operaciones a realizar en el sistema de producción, que incluyen las operaciones de producción, las operaciones de mando que organizan el arranque y la parada de los distintos modos de funcionamiento, y las operaciones auxiliares de inicialización, preparación, paros, avisos, etc.
Modelo de control procedimental	Los procedimientos (DOUs-Design Organization Units) que realizan las operaciones identificadas en el modelo de proceso.
Modelo físico	Los equipos físicos agrupados en función de las operaciones que realizan.
Modelo entidad equipo	Relación entre los procedimientos que realizan las operaciones y los equipos físicos en los que se ejecutan dichos procedimientos.
Modelo de estado procedimental Diagrama GEMMA	Estados del componente desde la perspectiva de control. Estos estados están asociados con los estados del sistema de producción.
Diagrama de casos de uso	Comportamiento del componente en respuesta a las interacciones con los actores o las partes interesadas.

Paso 2. Diseño arquitectónico del componente MeiA

El diseño arquitectónico incluye dos nuevos modelos de información: el modelo de integración (MI) organiza el estado del componente y sus conexiones con el entorno, mientras que el modelo del sistema de control (MSC) contiene el estado de su software de control. Ambos modelos se gestionan mediante los procedimientos que ejecutan las operaciones de control, tal y como se puede observar en la arquitectura del componente (figura 3). Los modelos de la norma IEC 61512, así como los modelos de integración y del sistema de control, se generan utilizando la «herramienta de modelado MeiA», basada en Sirius [13].

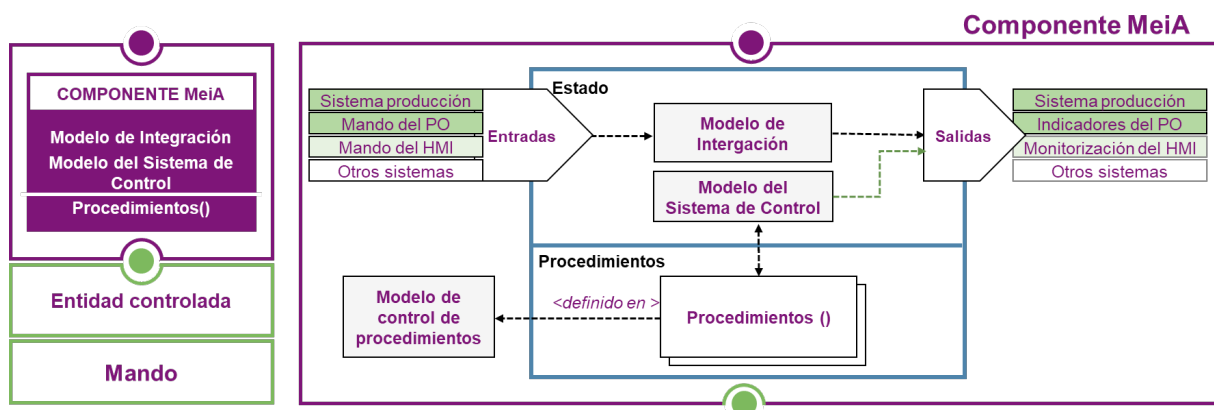


Figura 3

Arquitectura de un componente MeiA

Paso 3. **Diseño detallado del componente MeiA**

Este paso aborda el diseño detallado de los procedimientos, los modelos y el gemelo funcional. El diseño detallado de los procedimientos, utilizando el lenguaje de modelado GRAFCET [14], proporciona un conjunto de unidades de organización de diseño (DOU). Hay tres tipos de DOU:

- DOU de decisión que organiza el arranque y la parada de los diferentes modos de funcionamiento y coordina todos los estados posibles del componente.
- DOU de producción que realiza operaciones de producción, coordinación de operaciones, selección de parámetros de producción, etc.
- DOU auxiliar que realiza las condiciones iniciales y de seguridad, arranques, paradas, avisos, etc.

Cada fase de MeiA proporciona plantillas para los grafjets de decisión que incluyen las señales para la coordinación con los grafjets auxiliares y las señales que se utilizarán en los grafjets de producción.

Una vez completado el diseño detallado de los procedimientos (DOU), la información relacionada con el software de control del modelo de procesos y el modelo de control procedural se organiza de forma estructurada en el modelo del sistema de control. Así, este modelo organiza las operaciones agrupadas por modos de operación del modelo de procesos e incluye los procedimientos que realizan estas operaciones del modelo de control procedural. El modelo del sistema de control también añade las señales de control asociadas a cada procedimiento y las operaciones identificadas.

Además, la información de los diferentes actores que interactúan con el sistema de control del componente se organiza de forma estructurada en el modelo de integración. Este modelo incluye el modelo físico con todas las señales organizadas por dispositivos, el panel de operación con sus señales de mando e indicadores, otros dispositivos o equipos con funciones de mando y/o monitorización (HMI, servidor web, cliente OPC-UA, etc.), así como otros procesos que solicitan servicios al componente.

El gemelo funcional se diseña a partir de un conjunto de componentes de software reutilizables, denominados Componentes Funcionales Básicos (BFC), disponibles en la biblioteca de componentes. Opcionalmente, estos componentes funcionales permiten la inyección de fallos.

Paso 4. **Implementación del componente MeiA**

La información recopilada en el modelo de integración y el modelo del sistema de control constituye la base para la implementación de un componente MeiA en un proyecto de automatización estructurado de acuerdo con el modelo de software propuesto en la norma IEC 61131-3. Dentro de dicho proyecto, un componente se implementa mediante una Unidad de Organización de Programa (POU) de tipo Bloque Funcional (FB). El código, que debe ser un reflejo exacto del diseño detallado, se lleva a cabo utilizando los lenguajes propuestos en esta norma.

Cabe señalar también que, para cada variable creada a través de los pasos de implementación, se deben asignar permisos de acceso a los diferentes actores que interactúan con el componente. Estos permisos de acceso ya se han establecido en el diseño arquitectónico.

Paso 5. **Pruebas del componente MeiA**

Las pruebas de software son un proceso fundamental en el ciclo de desarrollo. En la rama derecha del modelo V (figura 2) se establecen tres fases de pruebas para cada componente: pruebas unitarias, pruebas de integración, y pruebas de verificación y validación.

En relación con las pruebas unitarias, el correcto funcionamiento de cada POU individual se comprueba con dos tipos de pruebas: estructurales y funcionales. Las pruebas estructurales de la parte secuencial comprueban la correcta activación y desactivación de los pasos del grafset, probando todas las posibles rutas de evolución y asegurando que se ejecutan correctamente. Las pruebas funcionales de la parte combinacional comprueban que las acciones se realizan correctamente cuando se activan los pasos. También se llevan a cabo pruebas de funcionamiento para comprobar que la funcionalidad de cada POU se realiza correctamente.

Las pruebas de integración permiten comprobar la correcta coordinación y sincronización entre las POU. Para ello, son necesarias tanto pruebas estructurales como funcionales. En cuanto a las primeras, se realizan pruebas de sincronización para comprobar las señales de coordinación entre las POU. En concreto, se comprueba que tanto los procedimientos auxiliares como las señales de mando se activan correctamente desde la POU de decisión de cada modo de funcionamiento. En relación con las segundas, se realizan pruebas de funcionamiento para comprobar todos los estados del componente y validar las operaciones implicadas (inicio, ejecución y parada correcta de cada operación). Además, también se realizan pruebas específicas para operaciones en paralelo.

Las pruebas de verificación permiten comprobar que el componente MeiA cumple los requisitos funcionales y no funcionales, mientras que las pruebas de validación proporcionan pruebas objetivas de que el componente cumple sus objetivos empresariales y los requisitos de las partes interesadas.

Capítulo 3

Caso de estudio: desarrollo del sistema de control de la célula de montaje flexible DISA FMS-200

El caso práctico aborda el desarrollo del software de control para la célula de montaje flexible DISA FMS-200. La célula consta de cuatro unidades de trabajo para llevar a cabo operaciones de montaje y almacenamiento de un dispositivo de giro. Un sistema de transporte modular se encarga de mover el palé con el dispositivo entre las unidades. Cada montaje (figura 4) consta de cuatro piezas: una base, un cojinete, un eje y una tapa. Se pueden obtener diferentes ensamblajes, ya que hay cojinetes con dos alturas (alto o bajo), ejes de dos materiales (aluminio y nailon) y tapas de dos materiales (aluminio o nailon), dos colores (claro u oscuro) y dos alturas (alto o bajo).



Figura 4

Dispositivo de giro con sus piezas.

La base está a la izquierda, las diferentes variantes de rodamientos, ejes y tapas están en el centro, y hay un ensamblaje final a la derecha

La figura 5 muestra la célula flexible de montaje del dispositivo de giro. El proceso comienza en la unidad S1-UBICACIÓN DE LA BASE, donde la base que servirá de soporte al

montaje se extrae de un almacén vertical y se coloca sobre un palé situado en la zona de carga. Para ello se dispone de varios cilindros que realizan las siguientes operaciones: extracción de la base del almacén, traslado de la base hasta la zona de transporte y comprobación de la posición de la base. Si la base está en posición incorrecta, se rechazará. Si la base está en posición correcta, se colocará sobre el palé mediante un manipulador neumático formado por dos cilindros y un sistema de vacío por ventosa.



Figura 5
Célula de montaje flexible DISA FMS-200

En la segunda unidad (S2-ROBOT), un robot inserta el rodamiento y el eje en la base situada en el palé ubicado en la posición de carga de la estación. Los rodamientos se encuentran en dos almacenes situados a la derecha del robot, uno para rodamientos gruesos y otro para finos. Los ejes se encuentran en dos almacenes ubicados a la izquierda del robot, uno para los ejes de aluminio y otro para los de nylon. El robot dispone de dos pinzas neumáticas, una para coger los rodamientos por el interior y otra para coger los ejes por el exterior.

La tercera unidad (S3-COLOCACIÓ DE LA TAPA) se encarga de encajar una tapa sobre la base para retener el eje previamente montado en la unidad anterior. En función de la altura, el color y el material de la tapa a colocar en cada ciclo de montaje, se deben realizar las verificaciones pertinentes. Estas operaciones se realizan en torno a un plato divisor de ocho posiciones con giros de 45° para intercambiar piezas entre los puestos, permitiendo realizar operaciones de forma simultánea. En el primer puesto, se colocará la tapa extraída de un alimentador por gravedad mediante un empujador accionado por un cilindro. Tres puestos se dedican a la detección de material y color de la tapa mediante un sensor inductivo, otro capacitivo y un detector fotoeléctrico. Otro puesto mide la altura de la tapa mediante un encoder lineal. En el anteúltimo puesto se evacúan las tapas incorrectas a través de una rampa, mientras que en el último puesto se inserta la tapa correcta sobre el conjunto retenido en la cinta transportadora.

Los conjuntos montados, que se han ido desplazando través de las diferentes unidades, llegan a la cuarta unidad (S4-ALMACÉN) donde se extraen del sistema de transporte y se almacenan, tras lo cual el palé ya vacío se dirige hacia la primera unidad para realizar un nuevo montaje. El almacén es una mesa que tiene capacidad para almacenar treinta conjuntos, los cuales puedan ser distribuidos en cualquier punto de la mesa. Para ello, dispone de un eje vertical con un sistema de sujeción y dos ejes posicionadores horizontales.

El sistema modular de transporte (ST-TRANSPORTE) gestiona la entrada y recogida de palés, y traslada los palés entre las unidades de trabajo. El sistema dispone de dos cintas de transporte que se accionan mediante sendos motores trifásicos, topes mecánicos y un sistema de lectura del código identificativo frente a cada unidad, elementos de elevación, centrado, giro, etc., necesarios para realizar las operaciones de transporte, trasvase entre tramos, y retención, detección y elevación de palés.

Todas las unidades disponen de un panel de operación con tres pulsadores (Start, Stop y Reset), un selector automático/manual (Auto/Man), un indicador de alarma y un pulsador de parada de emergencia.

A continuación, se describen las cuatro fases para desarrollar el software de control de la célula de montaje flexible DISA FMS-200.

Fase 1. Análisis del sistema de control

El sistema de control de la célula gestionará los modos de funcionamiento automático y de emergencia.

La solicitud del modo automático puede realizarse desde el botón de inicio de cualquier unidad o desde el sistema de supervisión, cuando todas las unidades tienen el selector automático/manual en posición automática. Para iniciar este modo de funcionamiento, todas las unidades deben estar detenidas en su estado inicial (condiciones iniciales y de seguridad) y listas para iniciar la producción (marchas de preparación ejecutadas para cargar completamente los almacenes de piezas).

La solicitud de parada durante la producción (parada de fin de ciclo) puede realizarse desde el pulsador de parada de cualquier unidad o desde el sistema de supervisión. Esta solicitud implica que se finalizarán los ensamblajes en curso y no se introducirán nuevos palés en el sistema.

La solicitud del modo de emergencia desde el control general implica una parada inmediata y segura del proceso de la unidad o unidades afectadas. Esta solicitud también se puede realizar desde el pulsador de parada de emergencia de cualquier unidad, lo que implica una parada inmediata y segura del proceso de dicha unidad. Una vez resuelta la emergencia, la desactivación de este modo de funcionamiento se lleva a cabo con el pulsador de reinicio y el desbloqueo del pulsador de parada de emergencia.

Fase 2. Diseño de arquitectura del sistema de control

La figura 6 muestra una fotografía de la célula de montaje DISA FMS-200 en la parte superior derecha, con las unidades de trabajo identificadas con círculos verdes. Por lo tanto, la arquitectura del sistema de control de esta célula consta de cinco componentes MeiA para las unidades (parte inferior de la figura 6) y un componente MeiA para el control general.

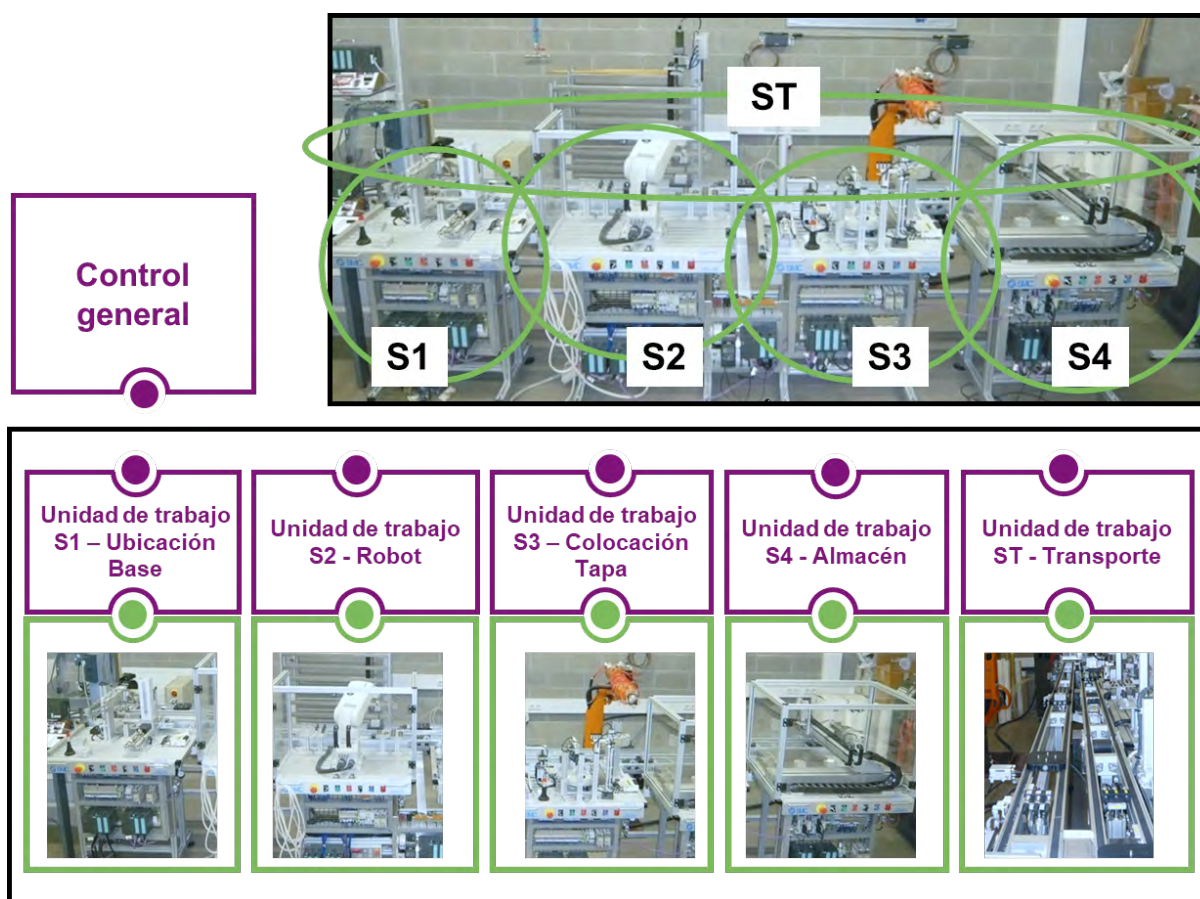


Figura 6

**Diseño arquitectónico del sistema de control
para la célula DISA FMS-200**

Fase 3. Desarrollo de los componentes MeiA

El desarrollo de los componentes MeiA de las unidades de trabajo se describe en el apartado 4 utilizando como ejemplo el componente que controla la unidad S1, mientras que el componente MeiA del control general de la célula se describe en el apartado 5.

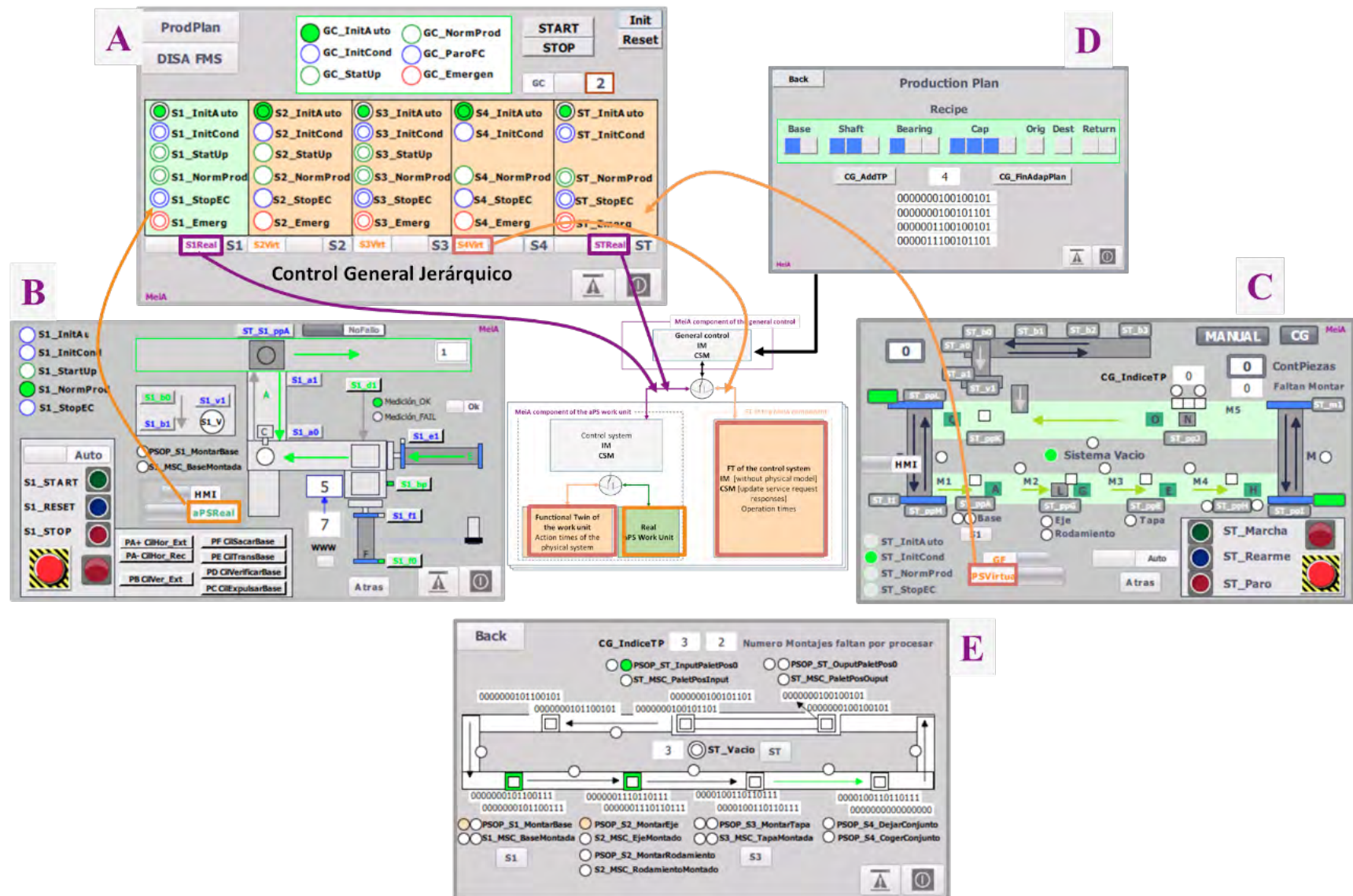


Figura 7

HMI para integrar los componentes y probar el sistema de control de la célula

Fase 4. Integración de componentes MeiA y pruebas del sistema de control

Los cinco componentes MeiA de las unidades de trabajo y sus correspondientes gemelos funcionales son necesarios para realizar la integración de estos componentes y las pruebas del componente MeiA del control general. En concreto, se han validado los modos de funcionamiento automático y emergencia del sistema de control de la célula de montaje flexible DISA FMS-200.

Los procedimientos de integración y pruebas utilizan la HMI del componente MeiA del control general (figura 7). La pantalla A muestra los cinco componentes de las unidades de trabajo conectados al componente del control general. Cada uno de ellos tiene un interruptor (parte inferior de la pantalla A) que permite trabajar con el gemelo funcional del componente MeiA o con el componente que controla la unidad. Así, esta ejecución funciona con los componentes de las unidades S1 y ST (letra morada), y con los gemelos funcionales de los componentes que controlan las unidades S2, S3 y S4 (letra naranja).

Junto a cada interruptor hay un botón para acceder a la HMI de cada unidad. En la HMI de la unidad, un interruptor permite trabajar con la unidad física (fondo verde) o con el gemelo funcional de la unidad (fondo naranja). Así, en este ejemplo, S1 trabaja con la unidad real (pantalla B), mientras que ST trabaja con el gemelo funcional de la unidad (pantalla C).

Una vez establecida la configuración de ejecución eligiendo entre entidades controladas reales y sus gemelos funcionales, se inicia el control de la célula. En primer lugar, solicita la ejecución de las condiciones iniciales de todas las unidades. A continuación, solicita el proceso de puesta en marcha de dichas unidades y se introduce el plan de producción mediante la pantalla D. La ejecución del plan de producción se puede observar en la pantalla E.

Capítulo 4

Desarrollo de un componente MeiA para una unidad de trabajo

Los pasos de desarrollo de un componente MeiA para una unidad de trabajo (figura 8) se ilustrarán mediante la construcción del sistema de control de la unidad S1-UBICACIÓN BASE de la célula de montaje DISA FMS200. Como ya se ha comentado, esta unidad extrae una base de un almacén vertical y comprueba su correcta orientación. Si la base está en la posición correcta, se carga en un palé situado en la posición de carga de la unidad de trabajo. Si la posición es incorrecta, la base es rechazada por una rampa de evacuación.

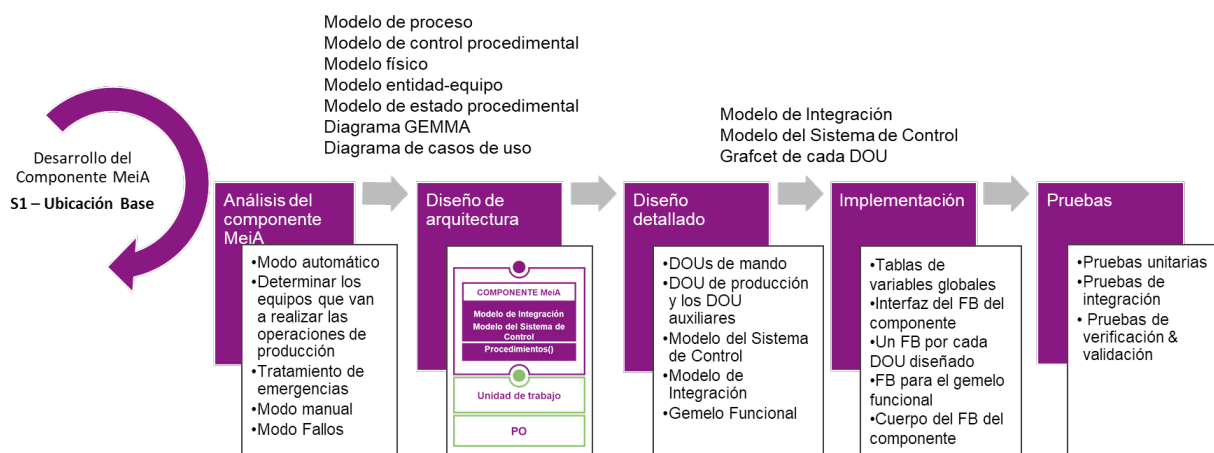


Figura 8

Pasos de desarrollo del componente MeiA para la unidad S1

4.1. Análisis del componente MeiA

Aunque el sistema de control de la célula solo gestiona los modos de funcionamiento automático y emergencia, al abordar el desarrollo del componente de una unidad se pueden añ-

dir modos de funcionamiento adicionales. Así, el componente MeiA de la unidad S1 contempla cuatro modos de funcionamiento: automático, manual, fallo y emergencia. Estos modos determinan las fases de la metodología MeiA que guiarán el análisis utilizando la terminología del dominio. Concretamente, el análisis se realizará de acuerdo con los pasos de la Fase I (secuencia principal del modo automático), la Fase II (modo manual), la Fase IV (fallos), la Fase V (emergencia) y la Fase VI (producción normal), tal y como se indica en la figura 9. A continuación, se detallan estas fases, primero las obligatorias y luego las opcionales.

●	Fase I: Secuencia Principal – Modo Automático	✓
●	Fase II: Modo Manual	✓
●	Fase III: Modo de Pruebas	
●	Fase IV: Fallos	✓
●	Fase V: Paro de Emergencia	✓
●	Fase VI: Producción Normal	✓

Figura 9

Fases de análisis para el componente MeiA

Cabe destacar el color asociado a cada fase: azul para el modo automático (fase I), verde para la producción (fase VI), rojo para la emergencia (fase V) o gris para los fallos (fase IV). Estos colores ayudan a interpretar y conectar los conceptos en los diferentes modelos obtenidos como resultado del análisis y diseño del componente.

Organización del arranque y parada del modo automático (Fase I)

Esta fase establece la secuencia principal, que organiza tanto el arranque en modo automático como la parada programada de la unidad, generando las señales de mando que informan a producción normal sobre el estado de la unidad en cada momento. El análisis de la Fase I se realiza siguiendo los pasos que se recogen en la figura 10, los cuales están más detallados en el Anexo.

Paso 1 - Solicitud de Funcionamiento Modo Automático
Paso 2 - Inicialización Parte Operativa – Condiciones Iniciales y de Seguridad
Paso 3 - Marcha de Preparación
Paso 4 – Solicitud de Paro a Fin de Ciclo
Paso 5 – Fin de Proceso
Paso 6 – Marcha de Finalización

Figura 10

Pasos de análisis para la Fase I-Modo automático

La solicitud del modo automático de la unidad S1 se puede realizar desde el componente MeiA del control general o desde el botón de inicio de cualquier unidad de la célula, siempre y cuando todas las unidades tengan el selector automático/manual en posición automático (Paso 1).

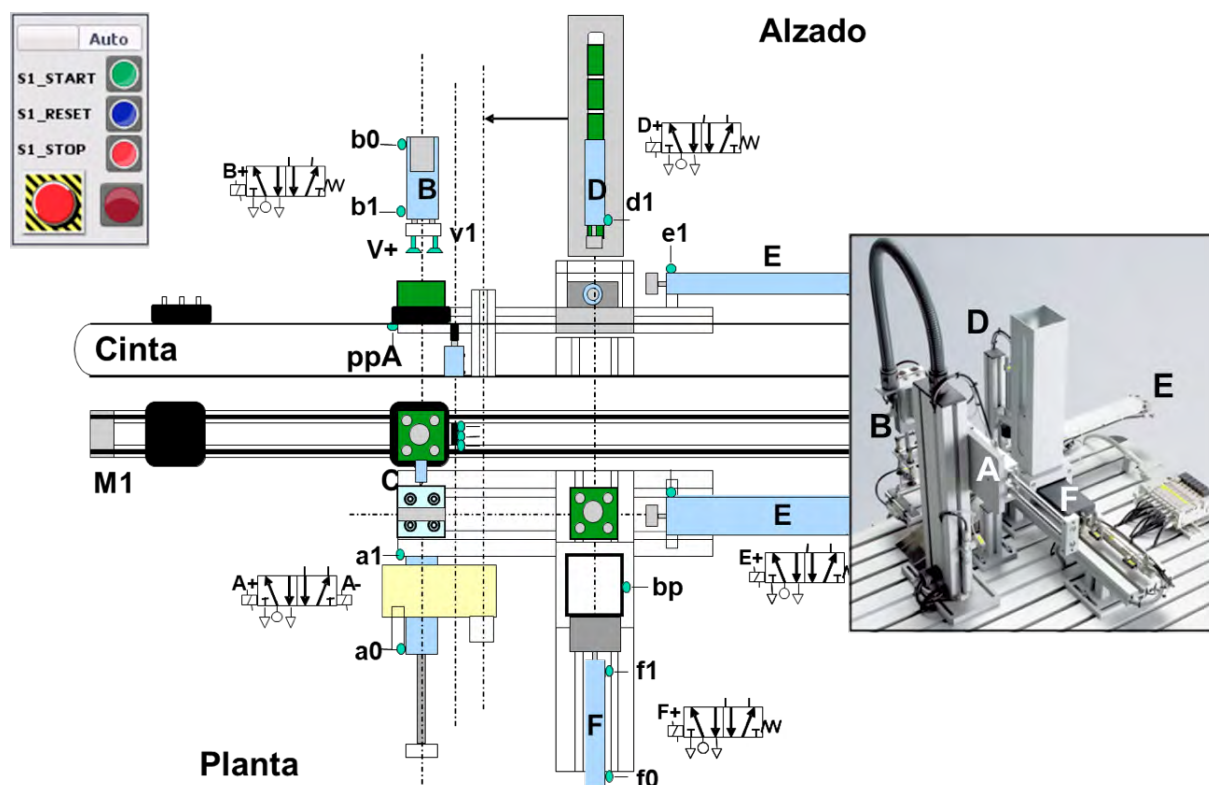


Figura 11

Unidad S1.

El panel de operación se encuentra en la parte superior izquierda, las vistas de planta y alzado en el centro, y una imagen de la unidad de trabajo a la derecha

No obstante, la situación de partida conocida y segura en la que debe estar la unidad cuando se solicita su funcionamiento automático (Paso 2), implica el estudio de los elementos del proceso (figura 11):

- Los cilindros deben estar en sus posiciones iniciales: el cilindro de doble efecto F que extrae la base del almacén, el cilindro E que desplaza la base hasta la zona de transporte y el cilindro D que verifica la posición de la base, todos ellos deben estar recogidos.
- El manipulador neumático con ventosa, que coloca la base correcta sobre el palé, debe tener recogidos los dos cilindros y desactivada la ventosa, es decir, el cilindro A (horizontal) con posición inicial sobre la base, el cilindro B (vertical) con posición inicial vertical arriba, y la ventosa sin base adherida por vacío detectado mediante un vacuostato.

Además, el sistema debe arrancar sin ninguna base en las posiciones de verificación y de transporte; si existen bases en estas posiciones, serán expulsadas de la unidad por la rampa de evacuación de bases incorrectas.

Antes de comenzar la producción será necesario comprobar que el almacén de bases se encuentra debidamente cargado (Paso 3). La capacidad del almacén es de 7 bases.

Durante la producción normal, la solicitud de paro del proceso (paro a fin de ciclo) estará a cargo del componente MeiA del control general o desde el pulsador de parada de cualquier unidad de la célula (Paso 4). El paro a fin de ciclo de la unidad implica que no se cargarán nuevas bases y el proceso se detendrá cuando finalice la carga de la base en curso.

El ciclo de producción termina una vez que la última base del plan de producción se ha cargado en el palé (Paso 5). Al terminar la producción no será necesario realizar ninguna operación adicional (Paso 6), ya que la unidad quedará sin piezas y con todos sus elementos situados en las posiciones iniciales.

Estos pasos de análisis permiten particularizar las plantillas de la Fase I correspondientes al modelo de proceso, el modelo de control procedimental, el modelo de estado procedimental, el diagrama GEMMA y el diagrama de casos de uso, tal y como se muestra en las figuras 12-16.

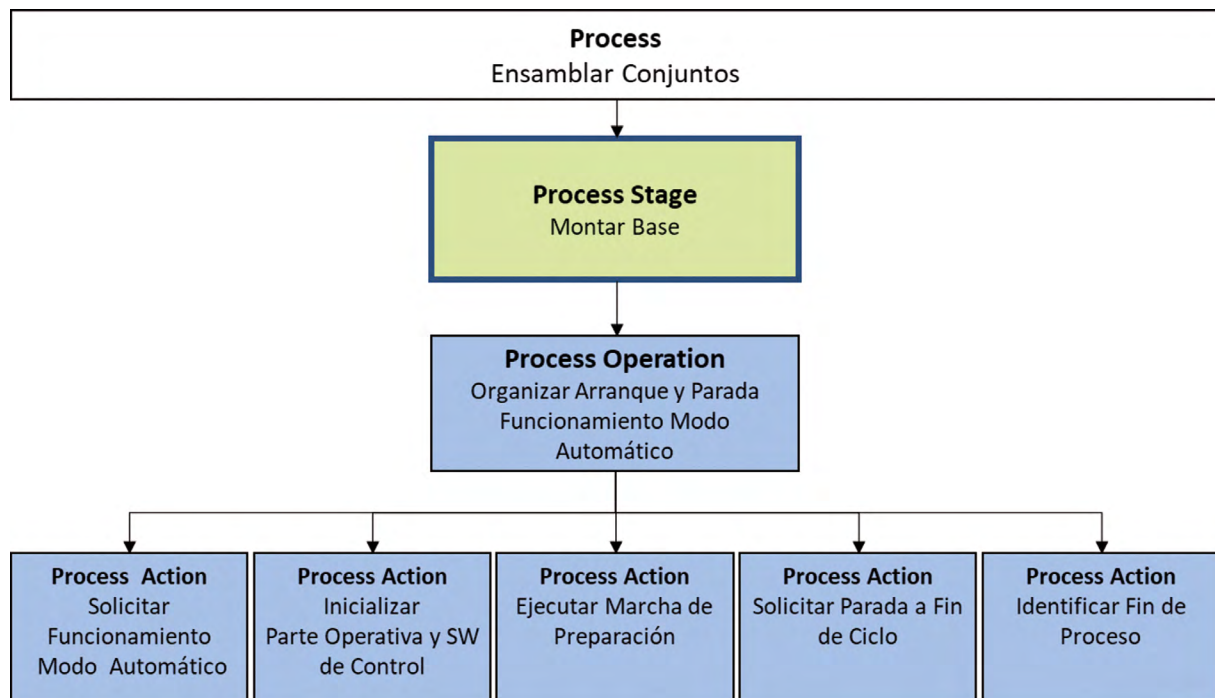


Figura 12

Modelo de proceso de la Fase I

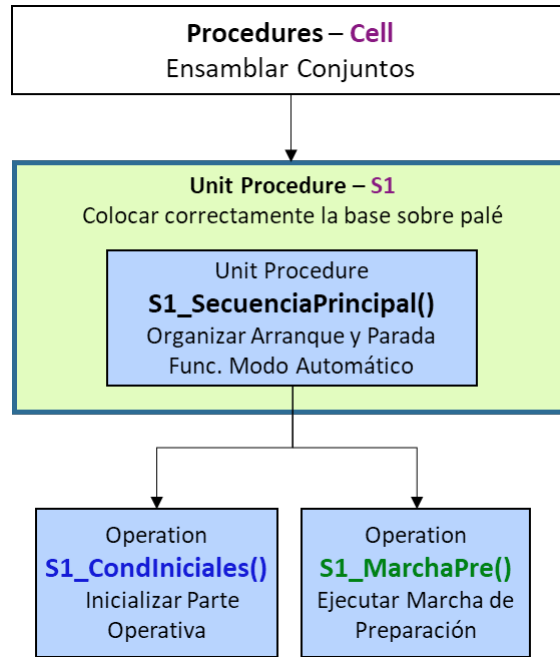


Figura 13

Modelo de control procedimental de la Fase I

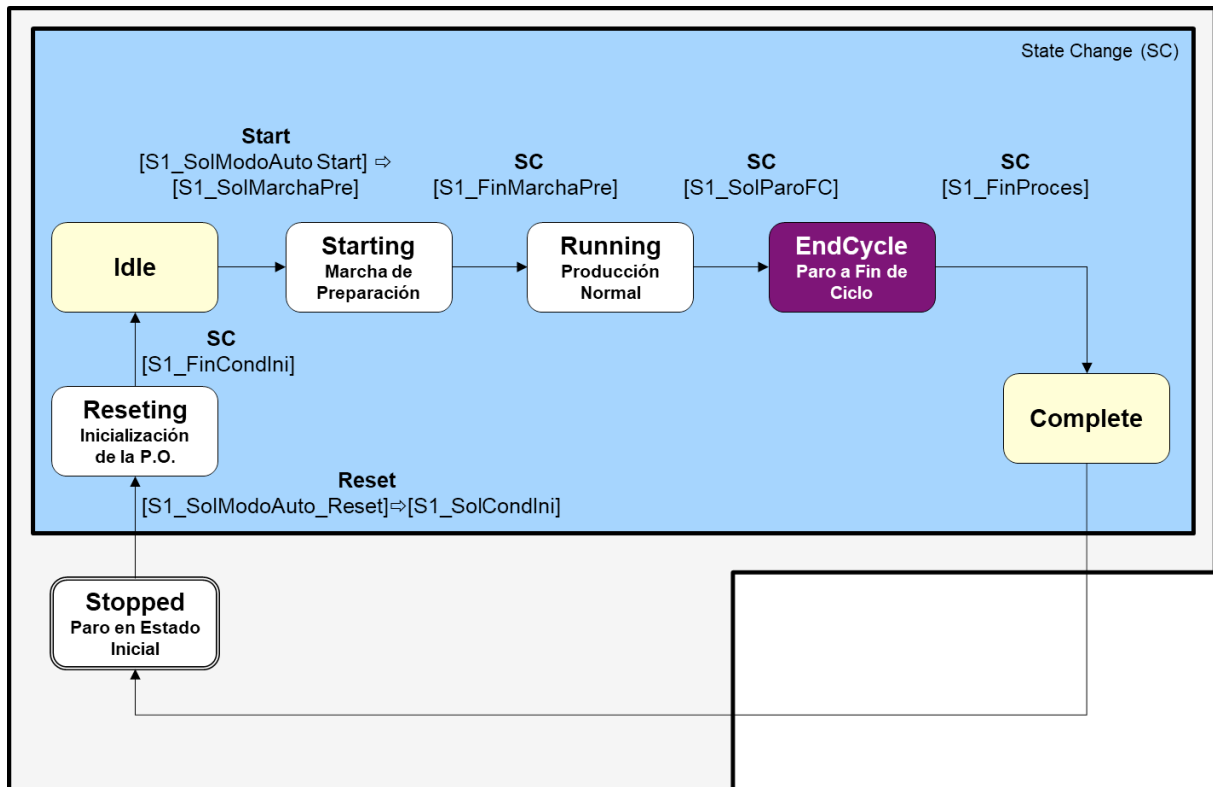


Figura 14

Modelo de estado procedimental de la Fase I

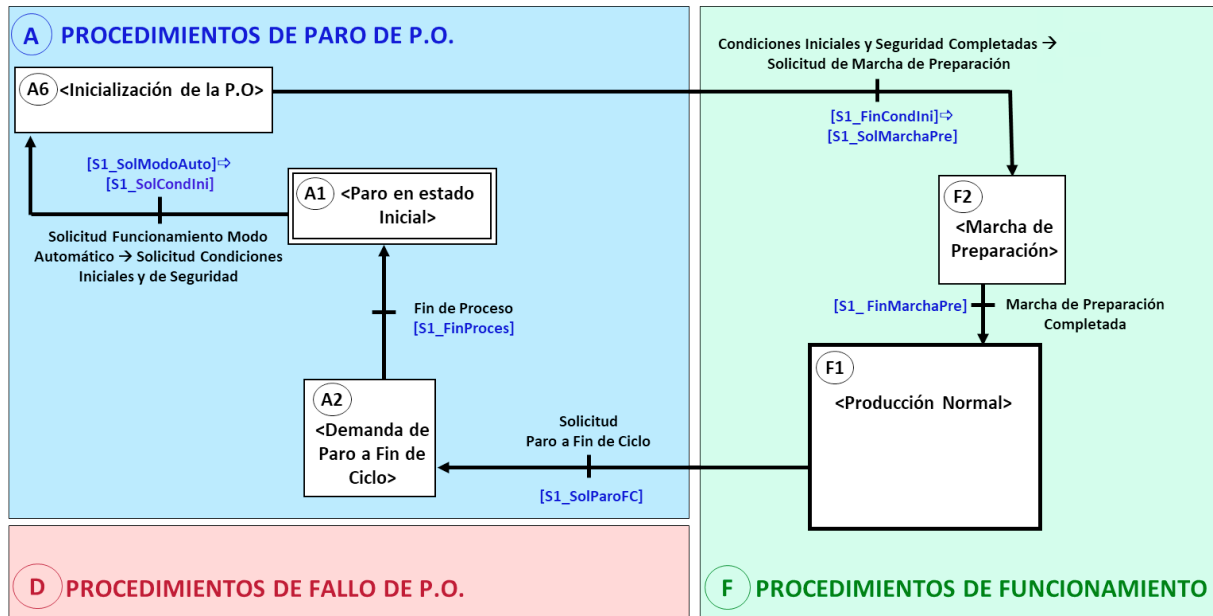


Figura 15

Diagrama GEMMA de la Fase I

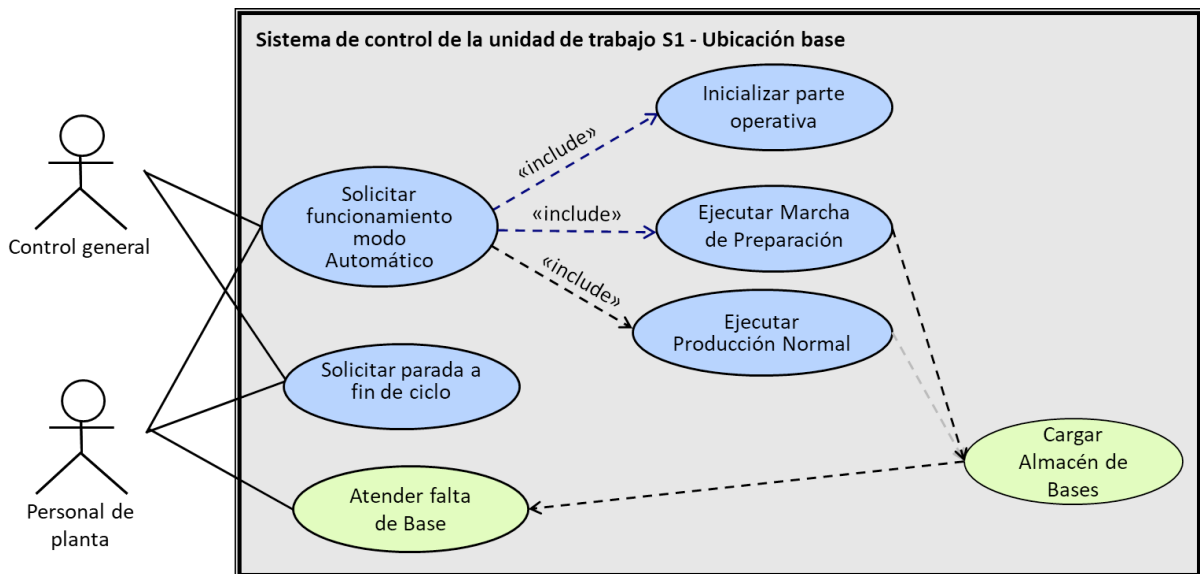


Figura 16

Diagrama de casos de uso de la Fase I

Estos pasos también permiten identificar las necesidades de supervisión y control a considerar en la HMI (figura 17), requiriendo pulsadores para la puesta en marcha, solicitud de parada a fin de ciclo y reset del proceso, así como indicadores de las señales que mostrarán la progresión de la secuencia principal:

- **S1_Inicio**: indica que el sistema está parado en el estado inicial.
- **S1_CondIni**: indica que se están realizando las condiciones iniciales y de seguridad.
- **S1_MarchaPre**: indica que se está realizando la marcha de preparación (carga del almacén de bases).
- **S1_ProdNorm**: indica que el proceso está en estado de producción normal.
- **S1_ParoFC**: indica que el proceso está realizando el paro a fin de ciclo.

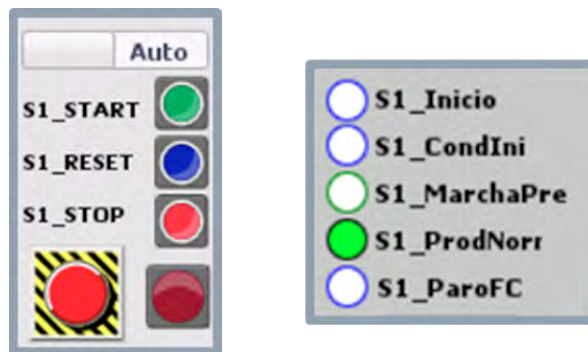


Figura 17

Pulsadores (izquierda) e indicadores (derecha) en la HMI para la Fase I

Entidades equipo que realizan las operaciones de producción (Fase VI)

El análisis de la Fase VI se realiza siguiendo los pasos que se recogen en la figura 18, los cuales están más detallados en el Anexo.

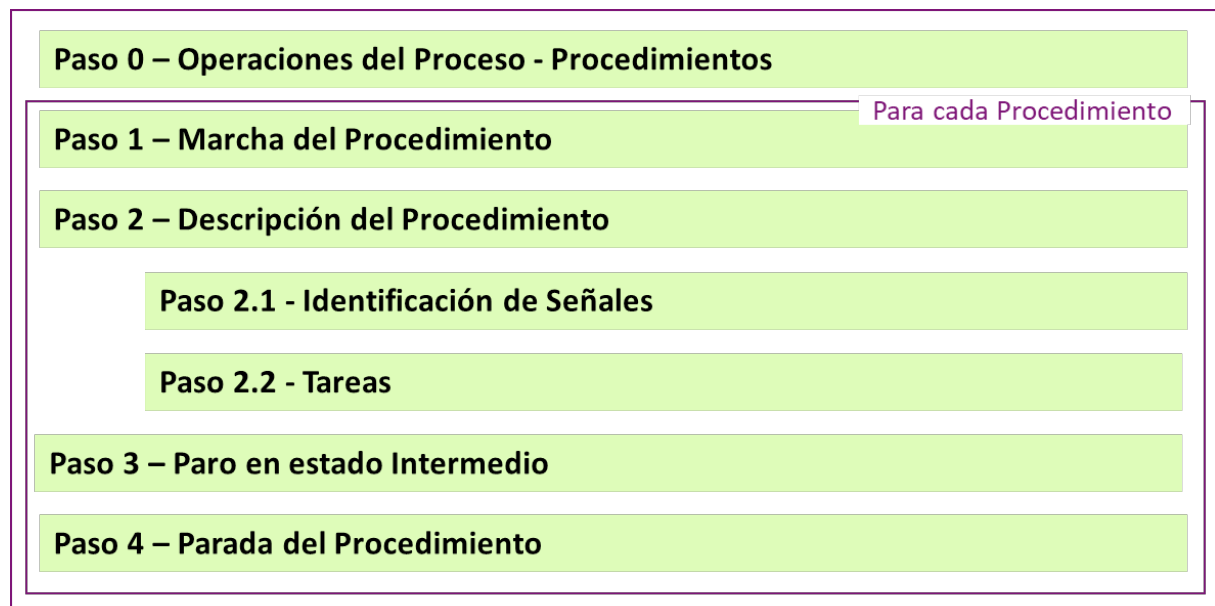


Figura 18

Pasos de análisis para la Fase VI-Producción normal

La organización jerárquica de los elementos de la unidad se dispone en el modelo físico, teniendo en cuenta los principios de subdivisión establecidos por la norma IEC 61512. En el modelo físico, las entidades de los equipos se agrupan según las operaciones que realizan (modularidad). La descomposición se lleva a cabo hasta identificar las señales de entrada y salida de todas las entidades que componen la unidad.

La delimitación gráfica del perímetro de las entidades de los equipos en el diseño de la unidad simplifica la identificación de las operaciones principales, los equipos y procedimientos involucrados, y su orden de ejecución. También destaca las operaciones auxiliares para los procesos de arranque y parada, así como las señales de coordinación entre operaciones cuando el sistema físico carece de ellas.

Como se puede observar en la vista de planta de la figura 19, la delimitación gráfica de las entidades de la unidad de trabajo S1 permite identificar tres operaciones:

- La operación **Alimentar Base Correcta** a cargo de la extracción de la base del almacén, la verificación y la colocación de la base correcta en la posición de trasvase.
- La operación **Montar Base sobre el Palé** que recoge la base de la posición de trasvase y la cargar sobre el palé, siendo el sistema de control del sistema de transporte el encargado de transportar dicho palé. Esta operación se realiza en paralelo con la operación anterior.
- La operación **Gestionar Almacén de Bases** que lleva el control de la entrada y salida de bases del almacén y la generación de los avisos mediante el procedimiento **Contabilizar número de Base**, así como la carga del almacén cuando se terminan las bases mediante el procedimiento **Cargar/Atender Falta de Bases**.

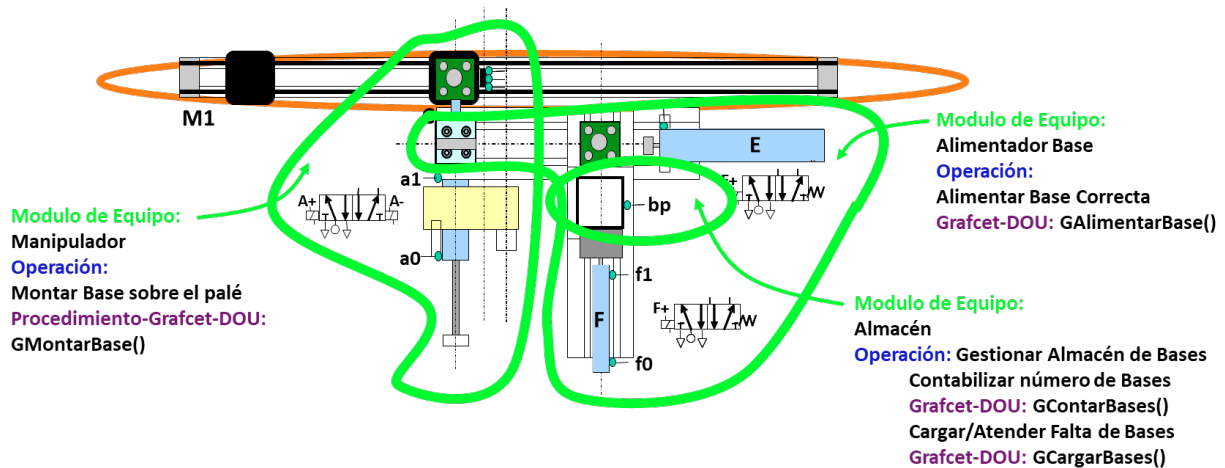


Figura 19

Delimitación gráfica de las entidades de la unidad S1

Como resultado de los pasos de análisis de esta fase, las operaciones de producción se añaden en el modelo de procesos, requiriendo un análisis individual para determinar qué procedimientos (que se añadirán al modelo de control procedimental) realizarán las operaciones en los equipos. La relación entre los procedimientos y las entidades de equipo que ejecutan estos procedimientos se recoge en el modelo de entidad de equipo, que se construye conectando el

modelo físico con el modelo de control procedimental. Las figuras 20-27 presentan las plantillas de la Fase VI particularizadas para la unidad S1.

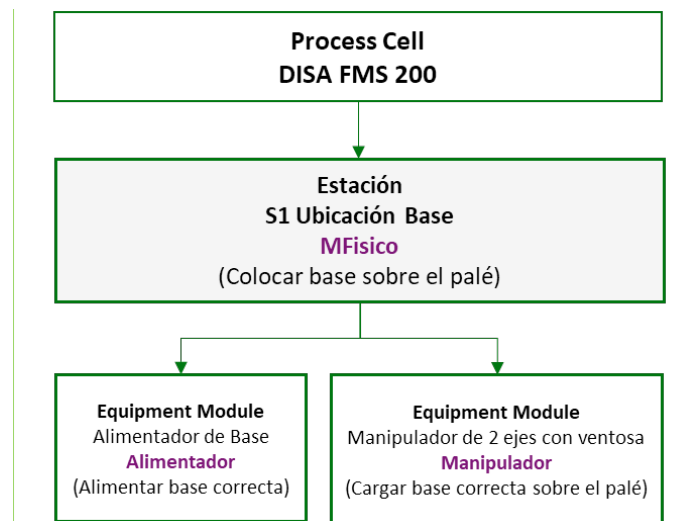


Figura 20
Modelo físico de la Fase VI

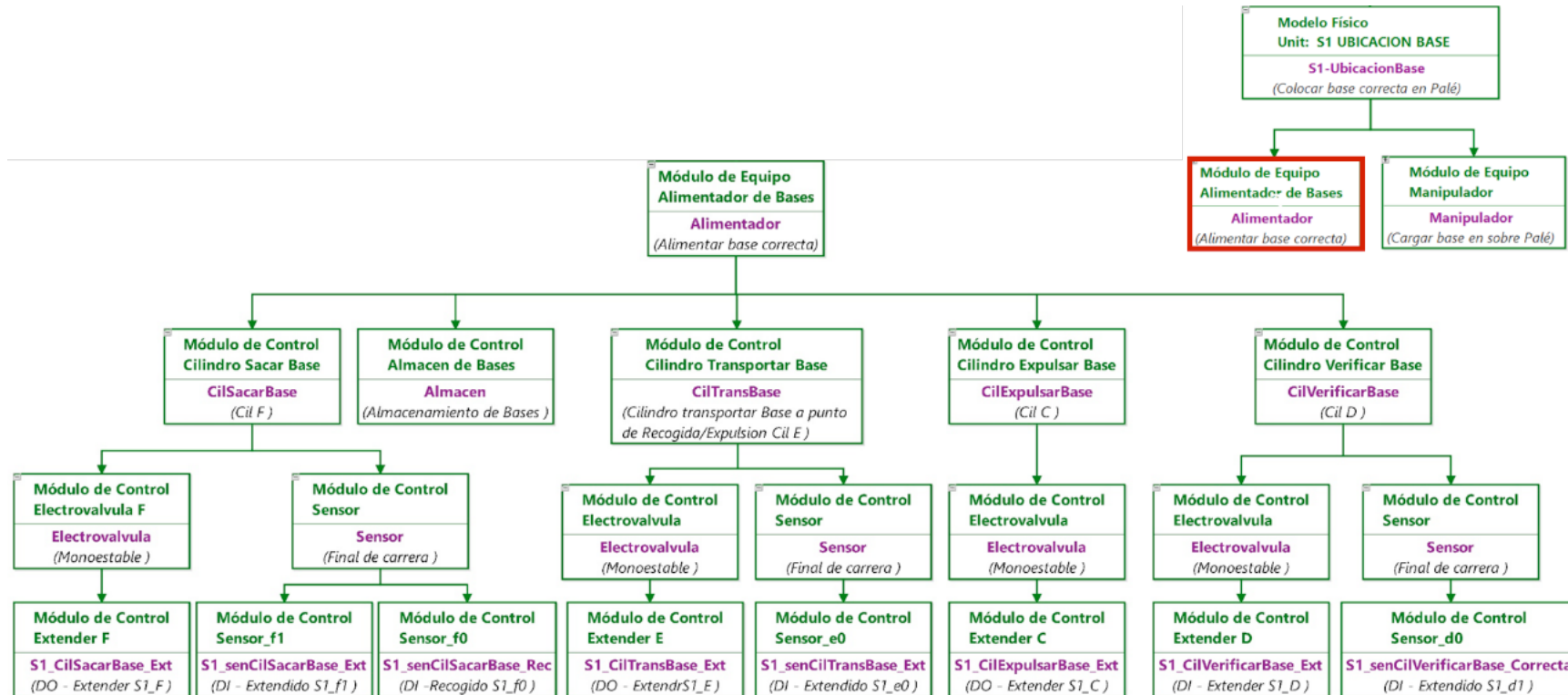


Figura 21

Detalle del módulo de equipo Alimentador de Bases del modelo físico de la Fase VI

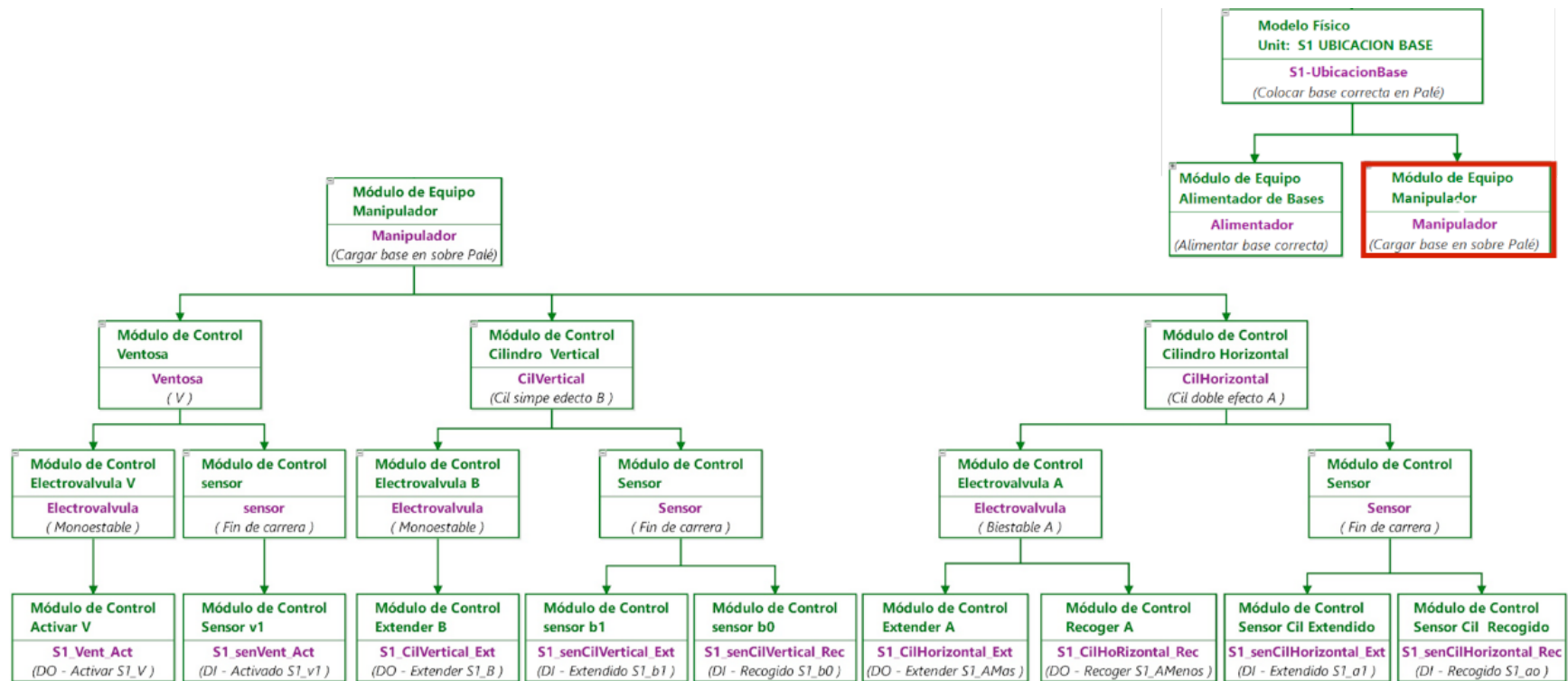


Figura 22

Detalle del módulo de equipo Manipulador del modelo físico de la Fase VI

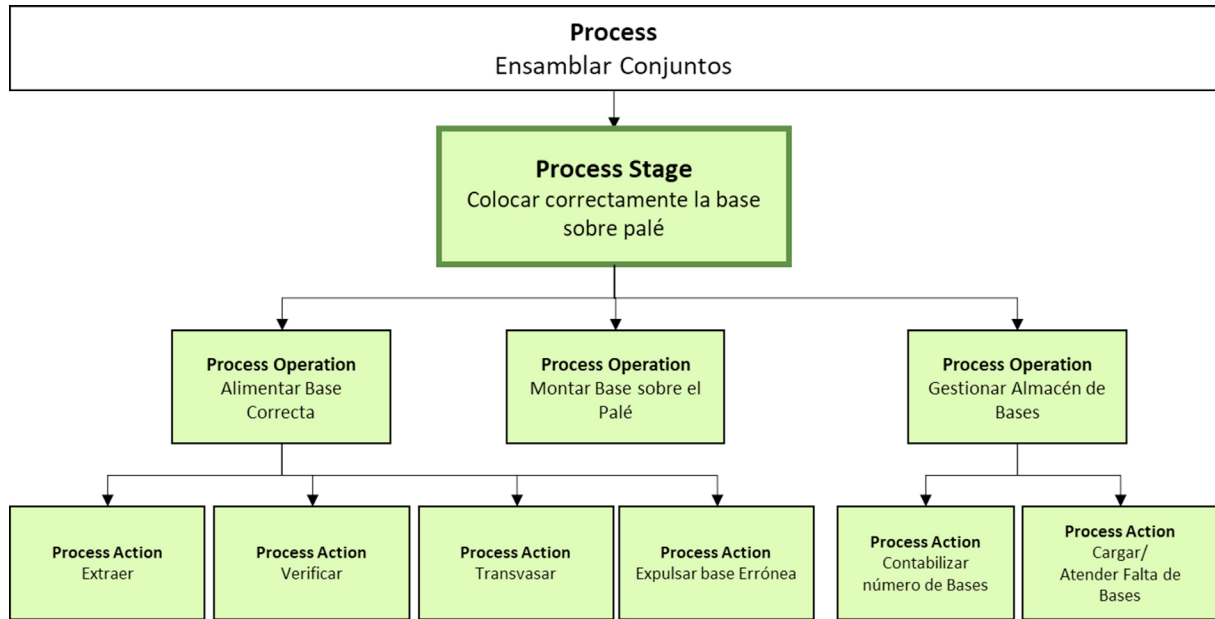


Figura 23

Modelo de proceso de la Fase VI

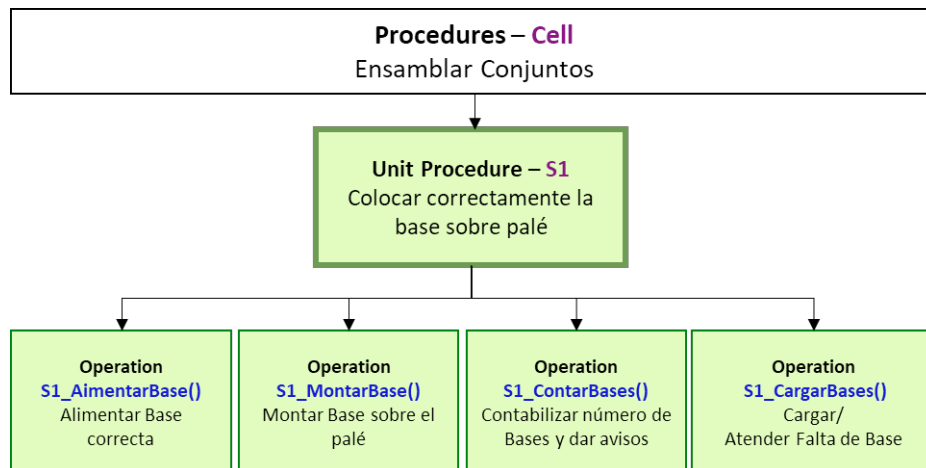


Figura 24

Modelo de control procedimental de la Fase VI

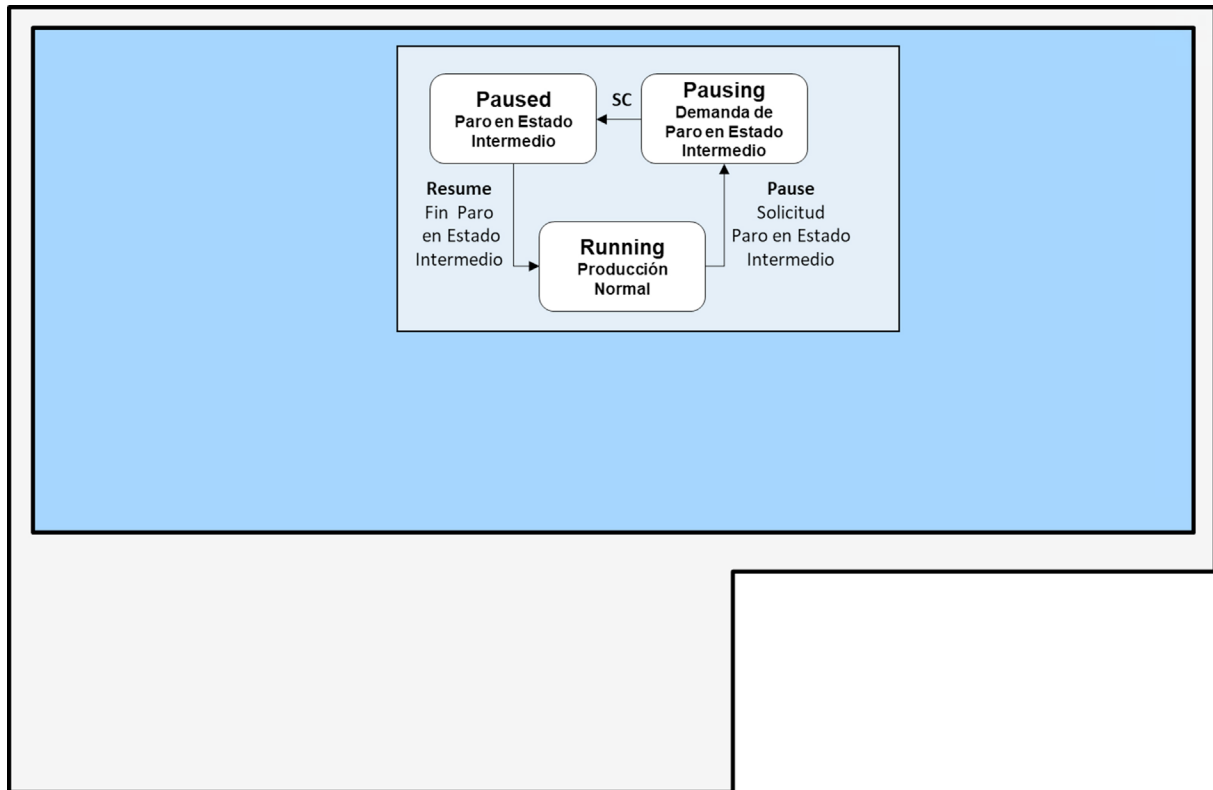


Figura 25

Modelo de estado procedimental de la Fase VI

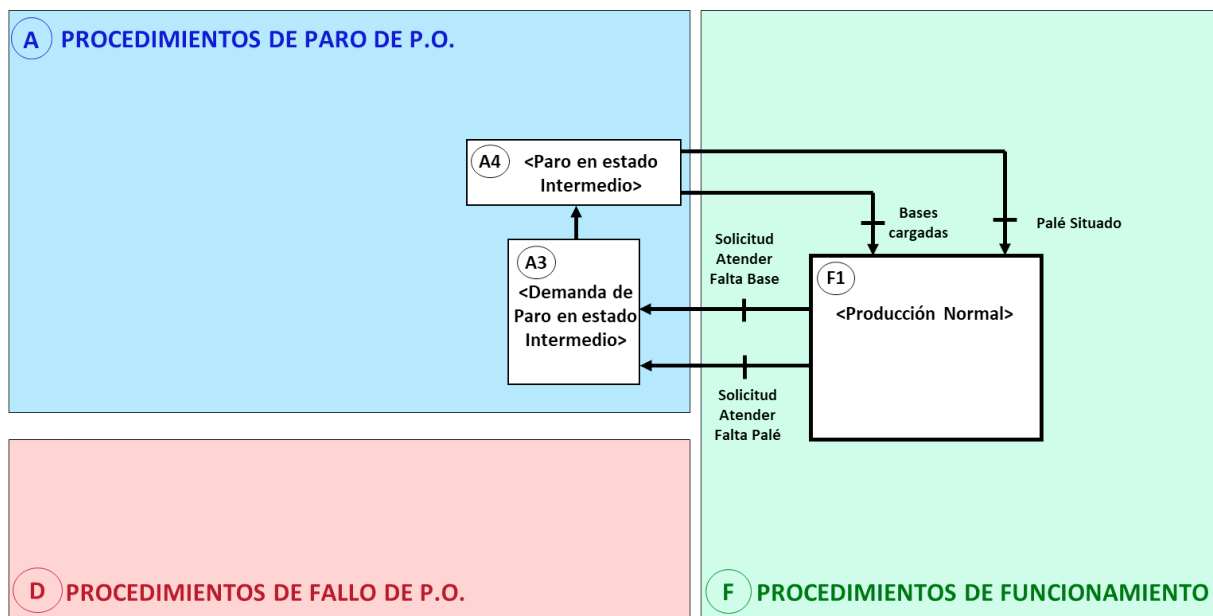


Figura 26

Diagrama GEMMA de la Fase VI

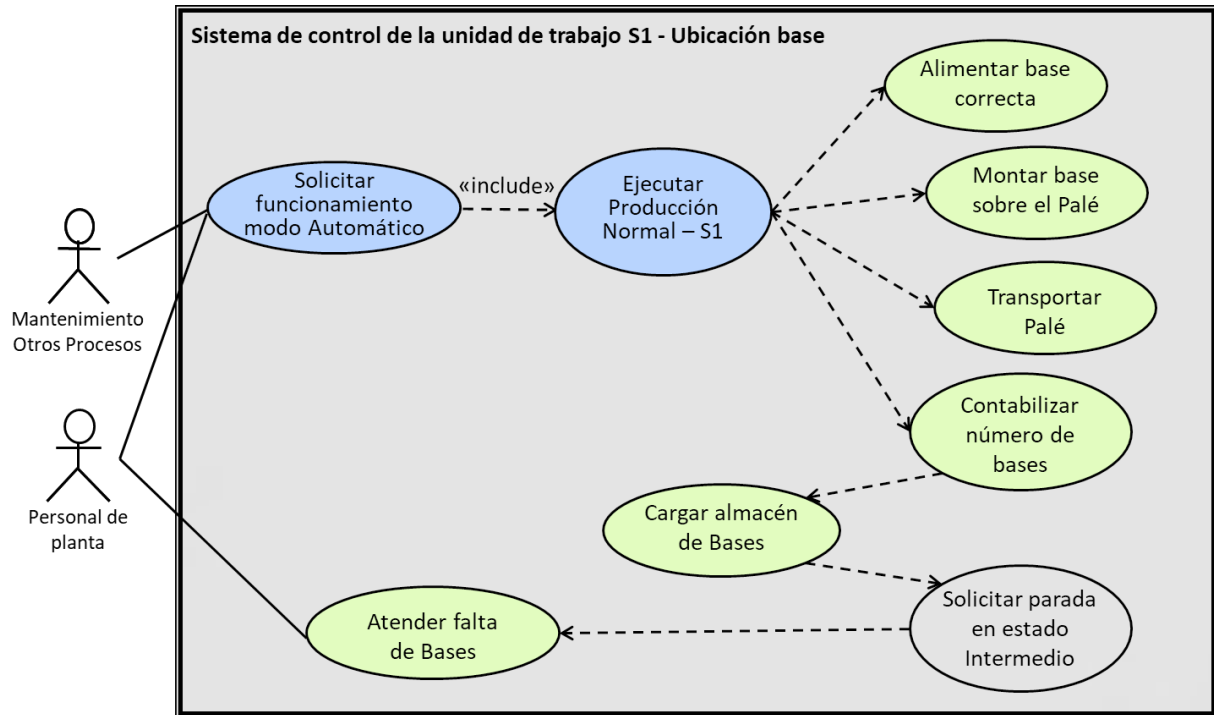


Figura 27

Diagrama de casos de uso de la Fase VI

Organización del arranque y parada de la emergencia (Fase V)

El análisis de la Fase V se realiza siguiendo los pasos que se recogen en la figura 28, los cuales están más detallados en el Anexo.

Paso 1 - Solicitud de Emergencia
Paso 2 – Emergencia – Parada Inmediata
Paso 2.1 – Parada Segura Emergencia
Paso 2.2 – Desactivación del Modo Automático
Paso 3 – Aviso de Emergencia
Paso 4 – Procedimiento de Emergencia – Protocolo de Actuación
Paso 5 – Solicitud Parada de Emergencia
Paso 6 – Inicialización Parte Operativa - Salida de Emergencia
Paso 7 – Preparación de Arranque - Salida de Emergencia
Paso 8 – Activación del Modo Automático

Figura 28

Pasos de análisis para la Fase V-Paro de emergencia

La solicitud del modo emergencia de la unidad S1 se puede realizar desde el componente MeiA del control general, lo que implica una parada inmediata y segura de la unidad o unidades afectadas, o desde el pulsador de parada de emergencia de la unidad, lo que implica una parada inmediata y segura de dicha unidad (Paso 1).

Para que la parada inmediata sea segura hay que considerar si la ventosa tiene sujeta una base. En tal caso la señal se mantendrá activada para evitar que la base caiga (Paso 2.1) y se desactivarán todos los procedimientos salvo el de emergencia (Paso 2.2).

El aviso de la emergencia se realizará mediante la activación de la alarma (Paso 3). Si la ventosa está activada con una base, se solicitará su retirada de forma manual mediante un mensaje (Paso 4).

La desactivación de la emergencia se realizará desenclavando la seta de emergencia o cuando se quite la señal de emergencia del sistema de supervisión y se dé al pulsador de rearme, o se solicite la desactivación desde el Control General (Paso 5). No se requiere realizar acciones al finalizar la emergencia (Pasos 6 y 7) y se inicializarán todos los procedimientos para restaurar la producción en modo automático (Paso 8).

Las figuras 29-33 presentan las plantillas de esta Fase particularizadas para la unidad S1.

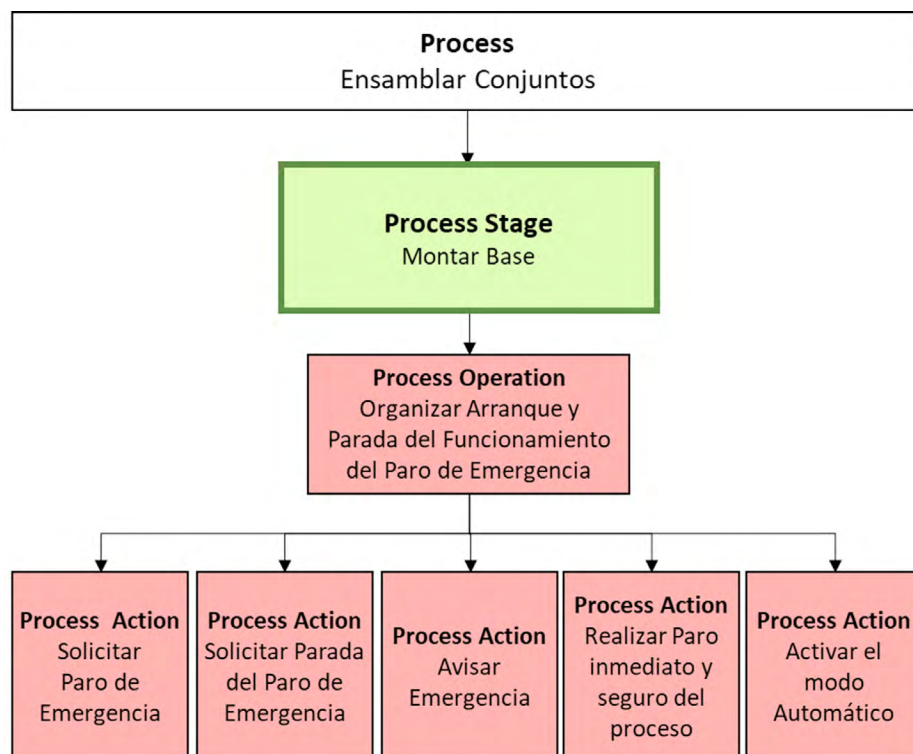


Figura 29

Modelo de proceso de la Fase V

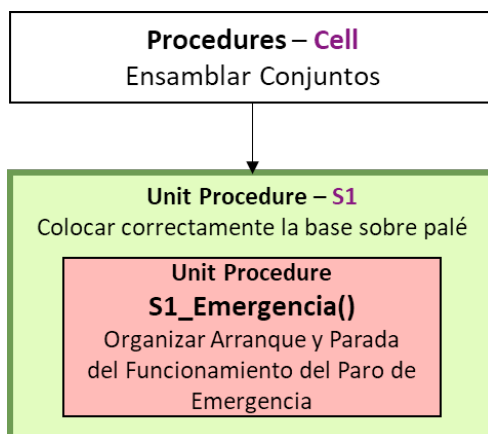


Figura 30

Modelo de control procedimental de la Fase V

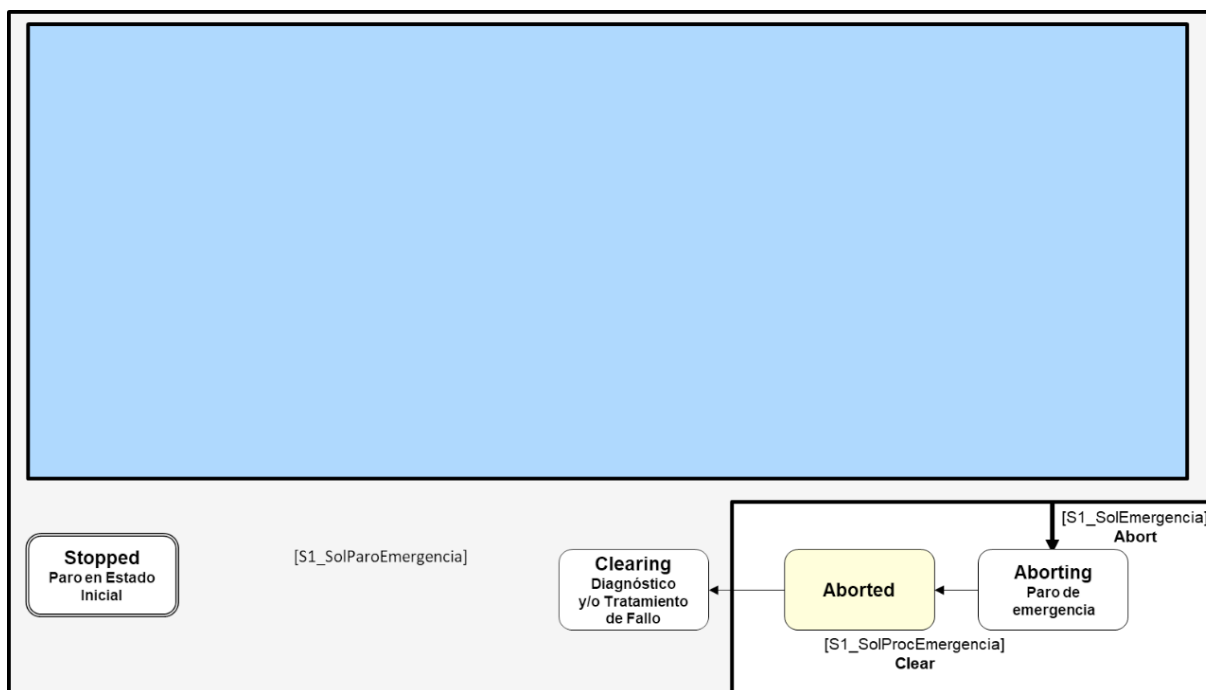


Figura 31

Modelo de estado procedimental de la Fase V

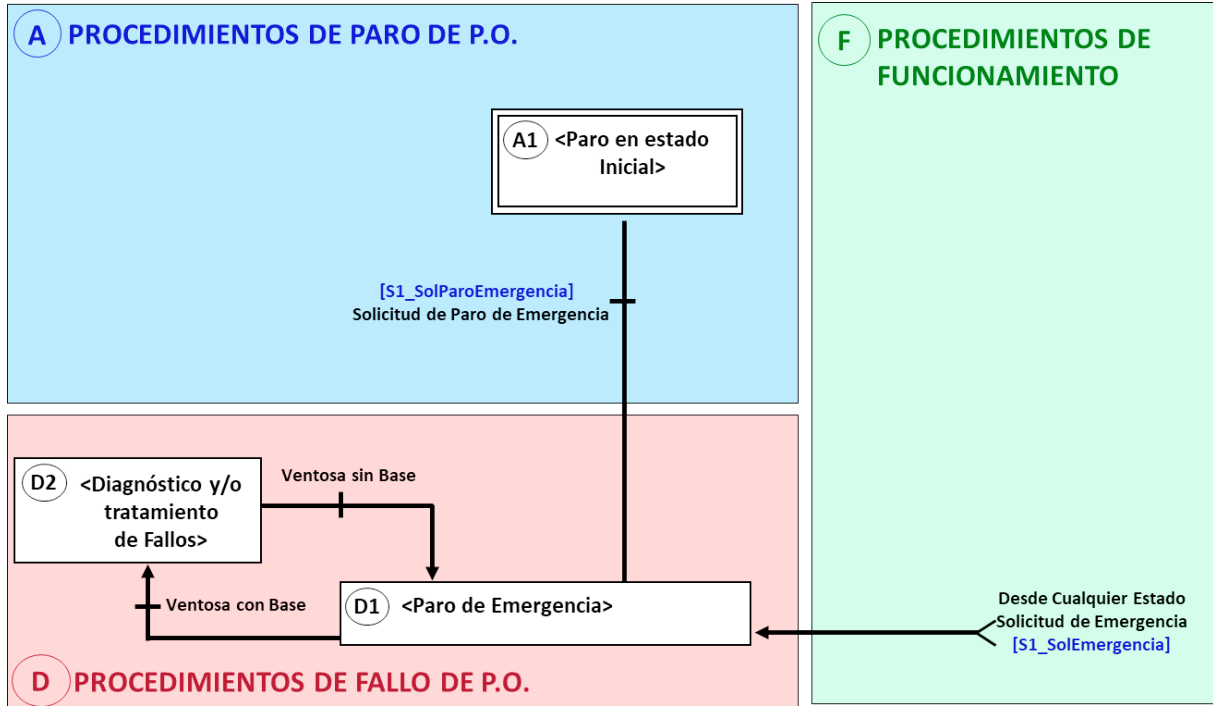


Figura 32

Diagrama GEMMA de la Fase V

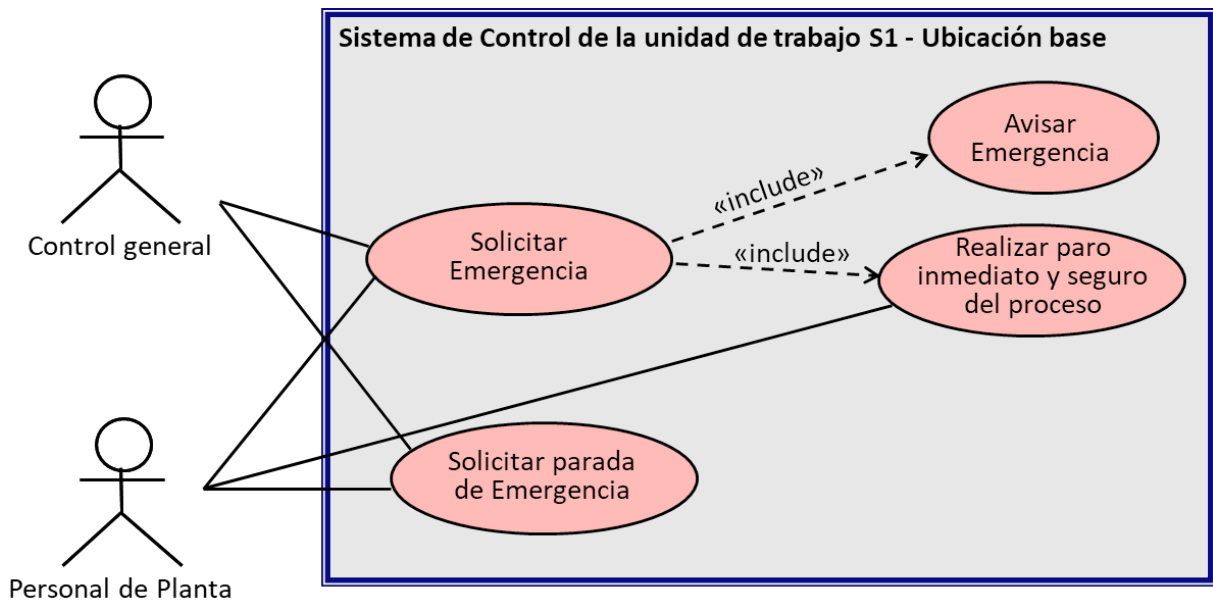


Figura 33

Diagrama de casos de uso de la Fase V

Organización del arranque y parada del modo manual (Fase II-opcional)

El análisis de la Fase II se realiza siguiendo los pasos que se recogen en la figura 34, los cuales están más detallados en el Anexo.

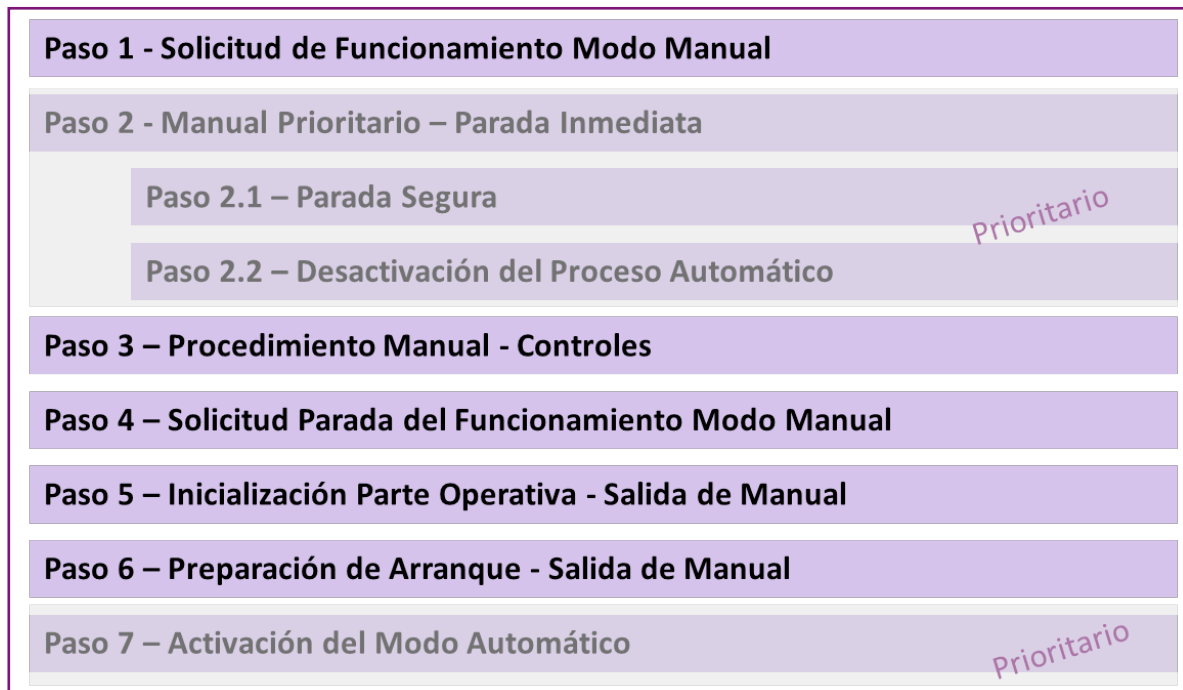


Figura 34

Pasos de análisis para la Fase II-Modo manual

La activación del modo manual se realizará desde la HMI de la unidad, siempre y cuando no esté trabajando en modo automático y el conmutador de la unidad esté en modo manual, es decir, la unidad esté en su estado inicial (Paso 1). Como el modo manual no va a ser prioritario, no se precisan ni el Paso 2 ni el Paso 7.

Para poder realizar las acciones del proceso de forma manual se utilizarán los controles disponibles en el sistema de supervisión de la unidad, de manera que se dispondrá de un pulsador por cada acción (Paso 3). Las acciones que se realicen en el sistema se visualizarán en la HMI.

La desactivación de este modo de funcionamiento se realizará cuando el conmutador de la unidad pase de modo manual a modo automático (Paso 4), no requiriendo realizar acciones al finalizar este modo (Pasos 5 y 6).

Las figuras 35-39 presentan las plantillas de la Fase II particularizadas para la unidad S1.

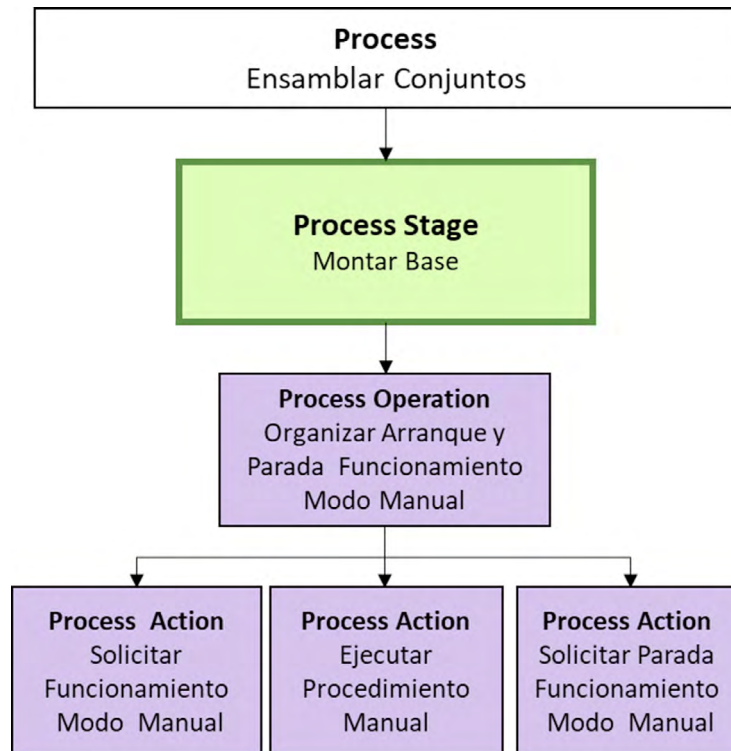


Figura 35

Modelo de proceso de la Fase II

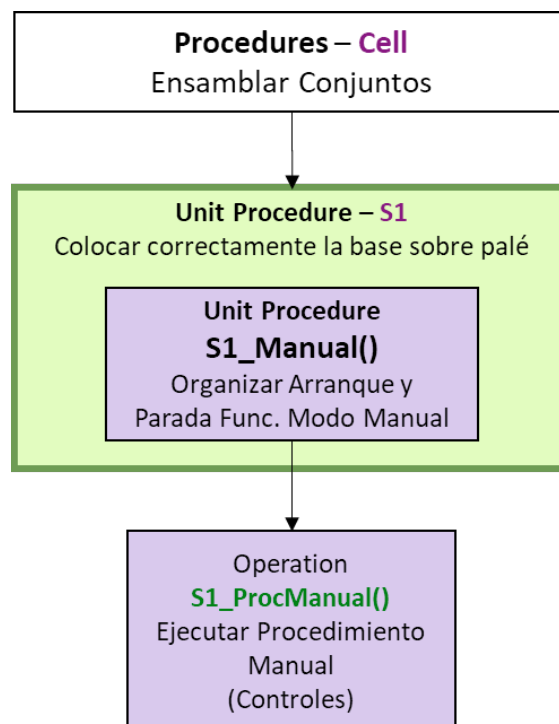


Figura 36

Modelo de control procedimental de la Fase II

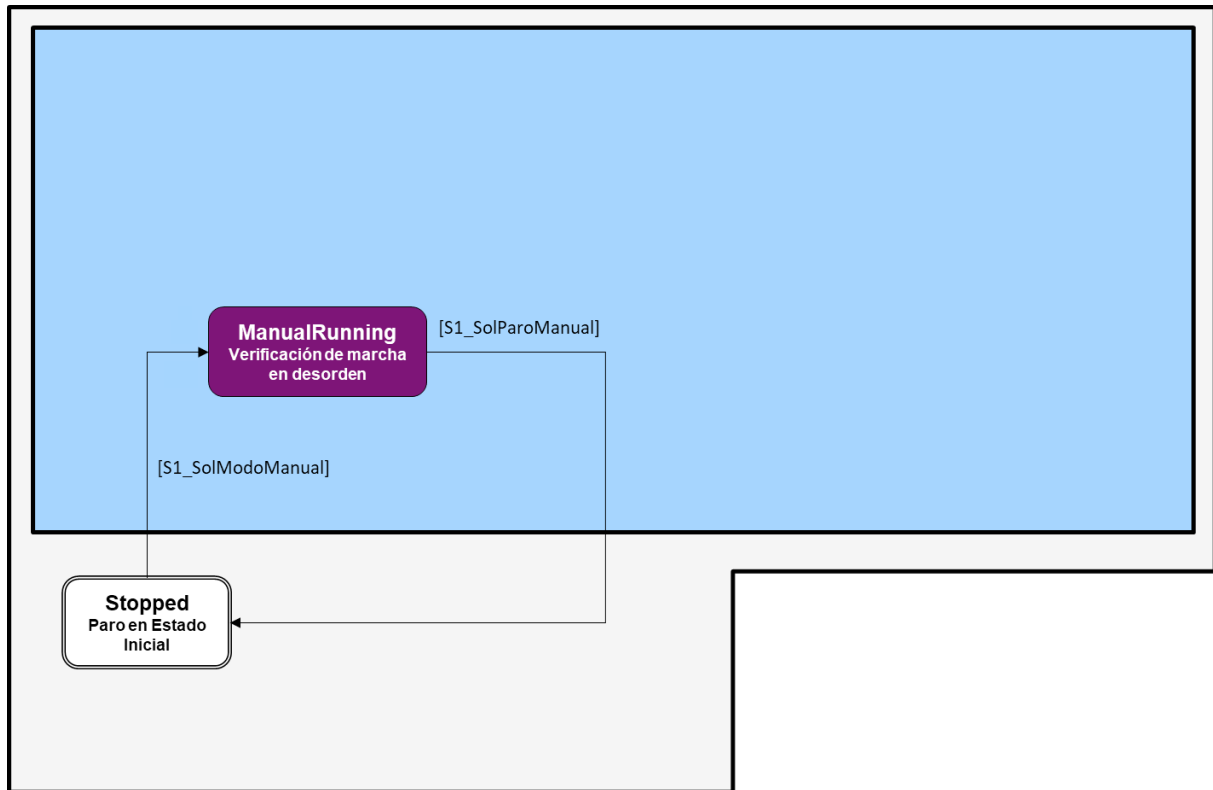


Figura 37

Modelo de estado procedimental de la Fase II

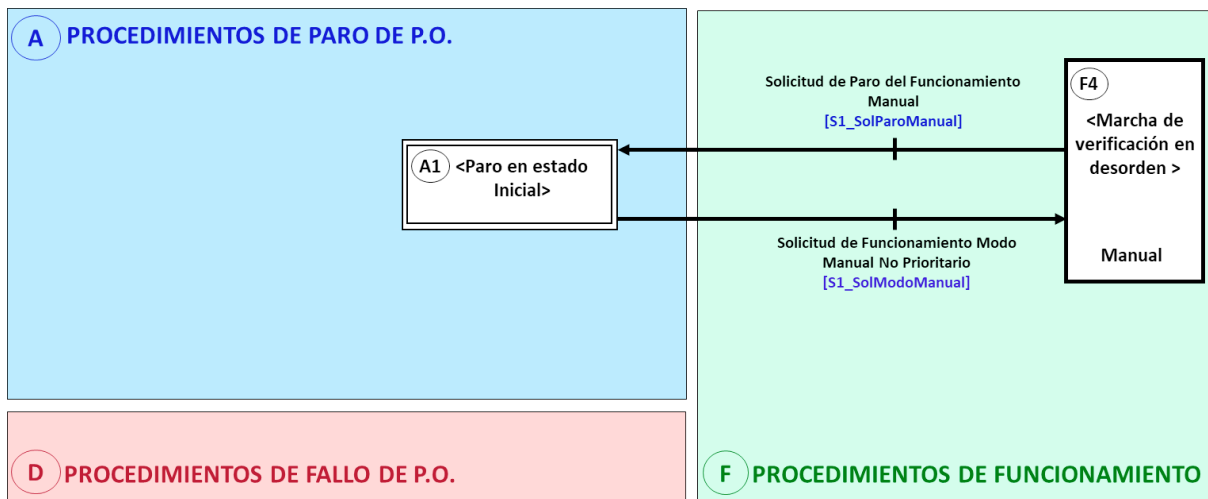


Figura 38

Diagrama GEMMA de la Fase II

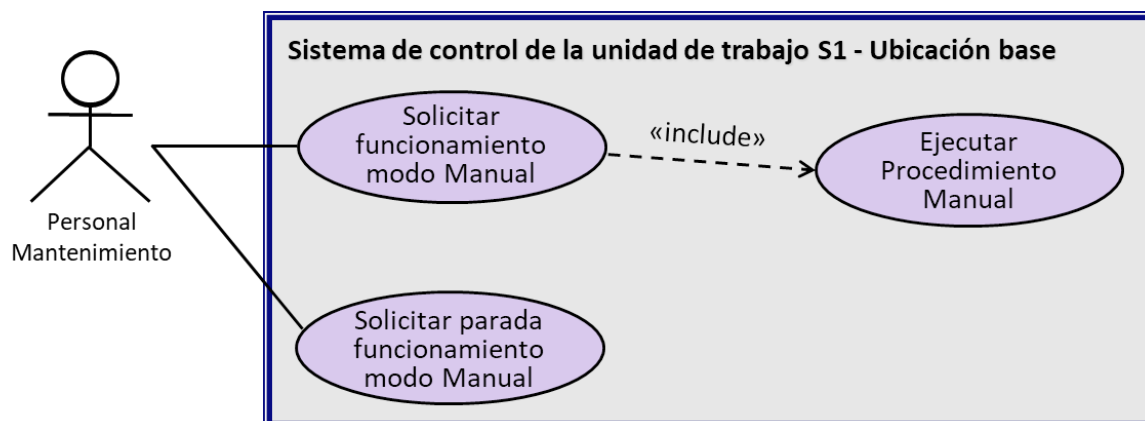


Figura 39

Diagrama de casos de uso de la Fase II

Gestión de los posibles fallos que pueden ocurrir (Fase IV-Opcional)

En esta fase se identifican, analizan y evalúan los fallos que pueden producirse en el proceso, identificando dos tipos: aquéllos que permiten que la unidad siga en producción (incluso aceptando degradación de la calidad del producto) y aquéllos que forzosamente harán evolucionar hacia una parada controlada. Aunque cada posible fallo requiere un análisis individual, las situaciones con un tratamiento similar pueden agruparse. La personalización de las plantillas para cada fallo requiere completar los pasos que se recogen en la figura 40, los cuales están más detallados en el Anexo.

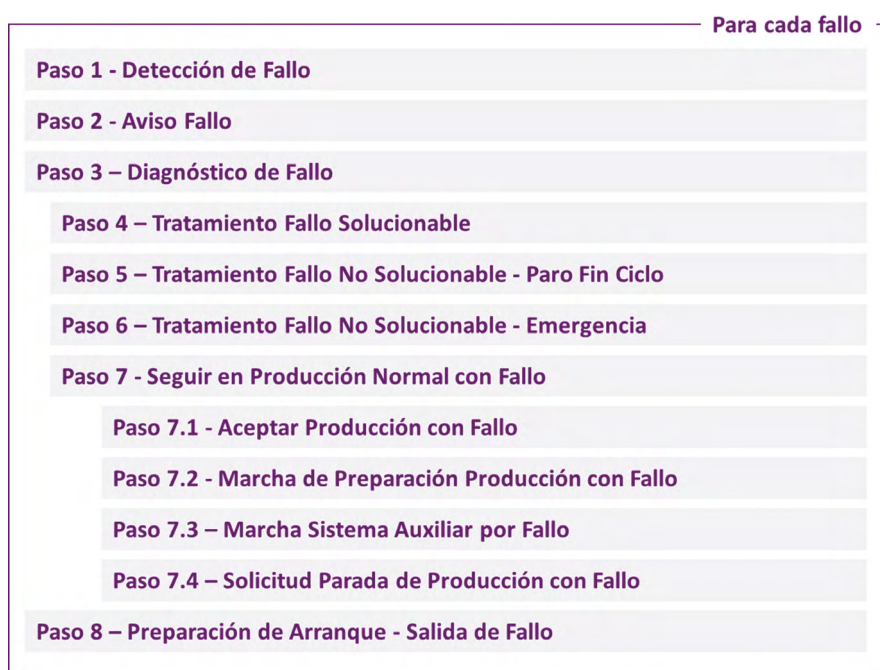


Figura 40

Pasos de análisis para la Fase IV-Modo fallos

En la unidad S1 se ha identificado el fallo «tiempo excedido en la espera de un palé para el transporte de la base», que se produce cuando el manipulador tiene una base preparada para cargar y, transcurridos 60 segundos, no se dispone de un palé para cargar dicha base (Paso 1).

Este fallo se señalará activando la barra luminosa y la alarma, y enviando un mensaje al personal de planta (Paso 2). También hay que informar al control de célula, que avisará al componente que controla el sistema de transporte para que diagnostique (Paso 3) y trate el fallo (Paso 4-Paso 7). No se requieren acciones al finalizar este modo de funcionamiento (Paso 8).

Las figuras 41-45 presentan las plantillas de la Fase IV particularizadas para la unidad S1.

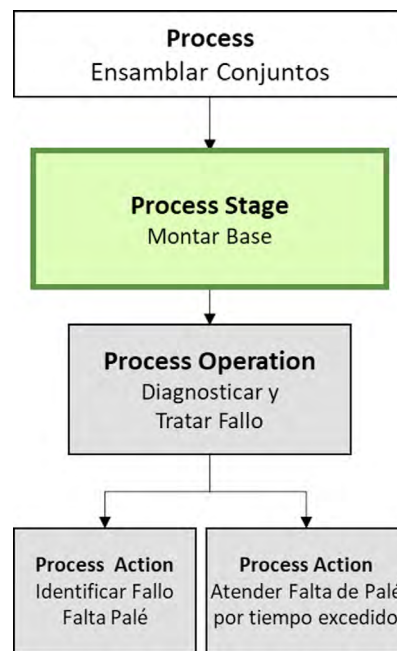


Figura 41

Modelo de proceso de la Fase IV

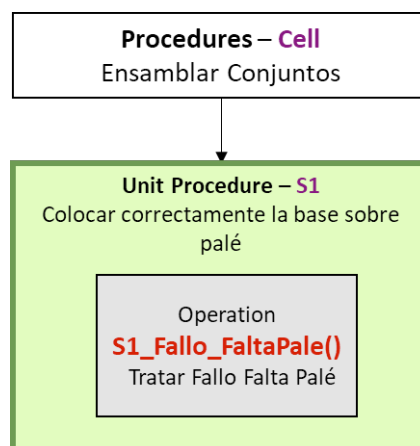


Figura 42

Modelo de control procedimental de la Fase IV

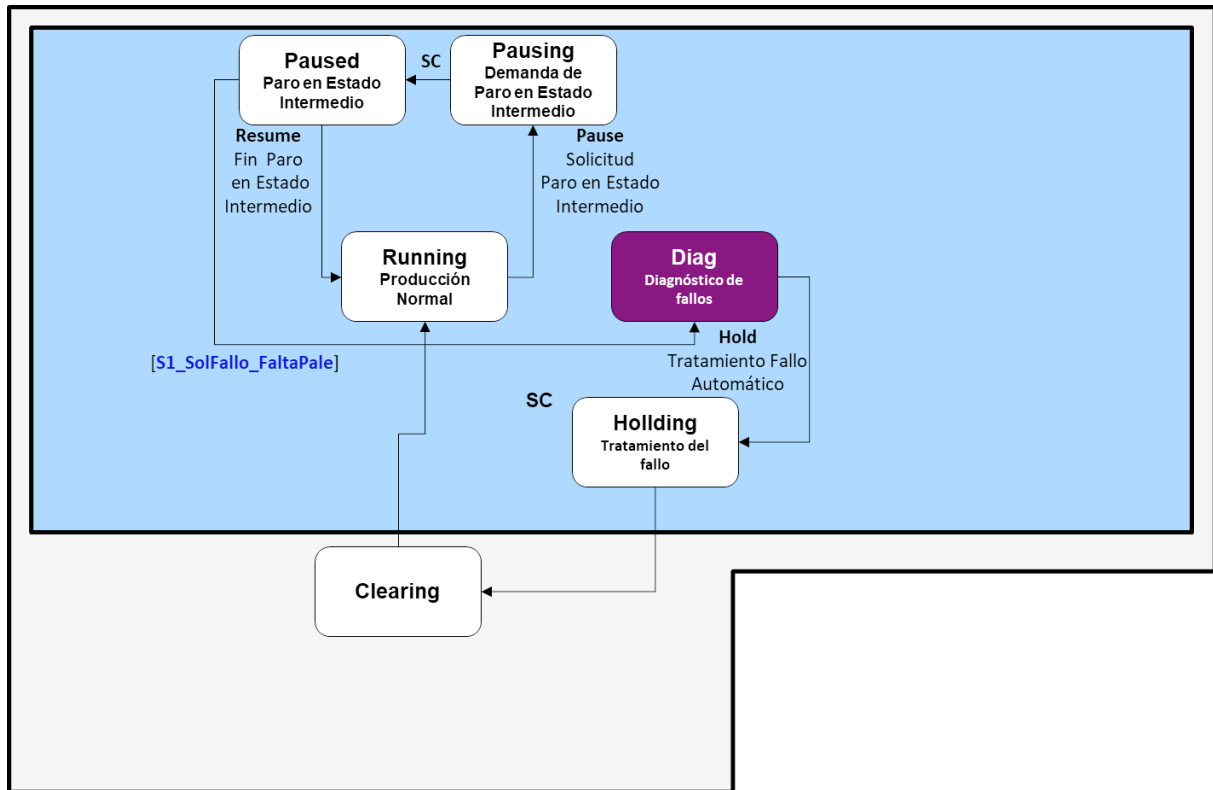


Figura 43
Modelo de estado procedimental de la Fase IV

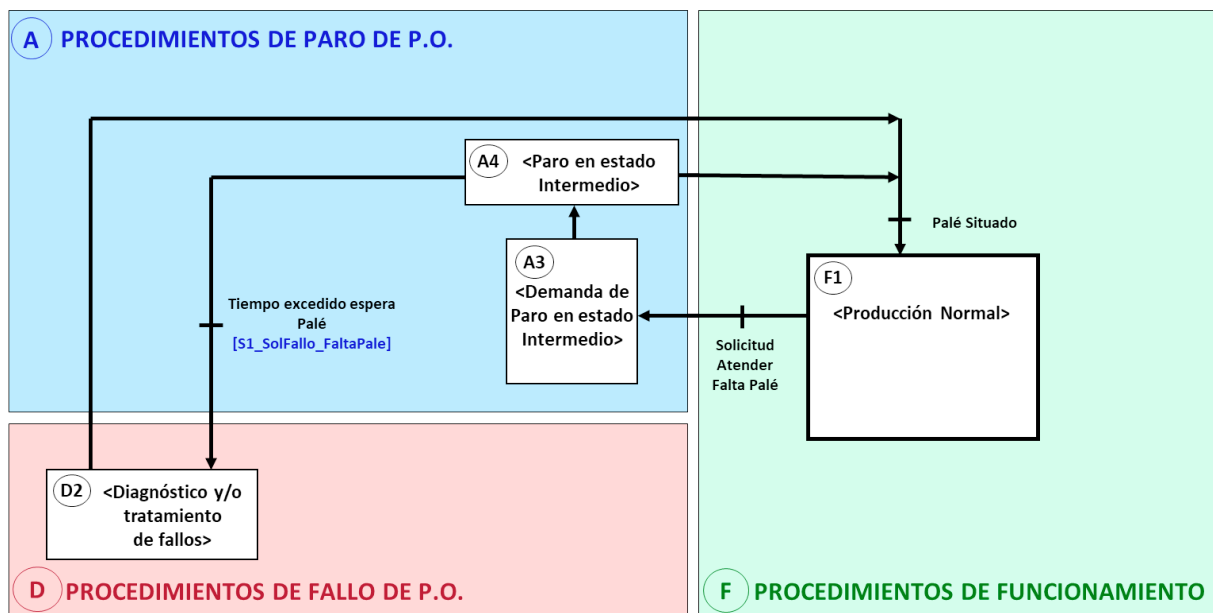


Figura 44
Diagrama GEMMA de la Fase IV

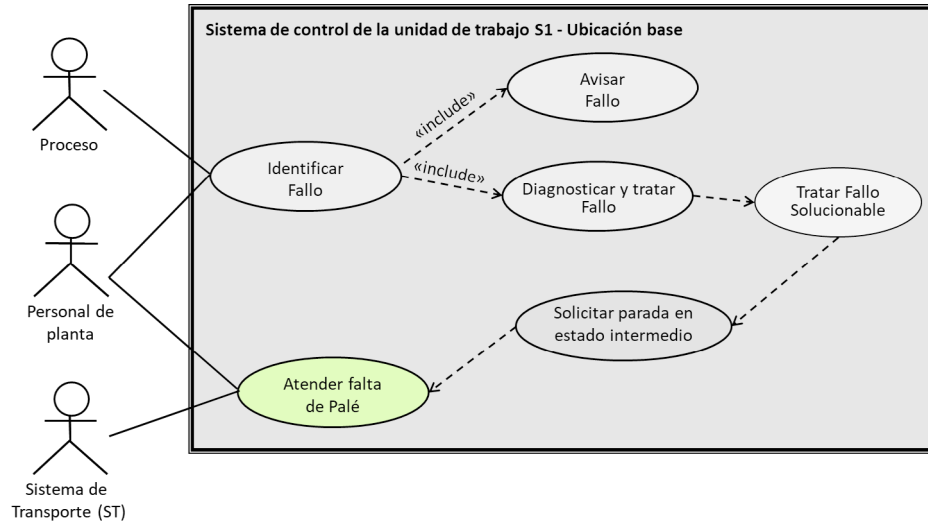


Figura 45
Diagrama de casos de uso de la Fase IV

Una vez finalizado el análisis, los modelos necesarios para construir y documentar el componente MeiA se obtienen unificando los modelos obtenidos en cada una de las fases. La figura 46 presenta los modelos del componente de la unidad S1.

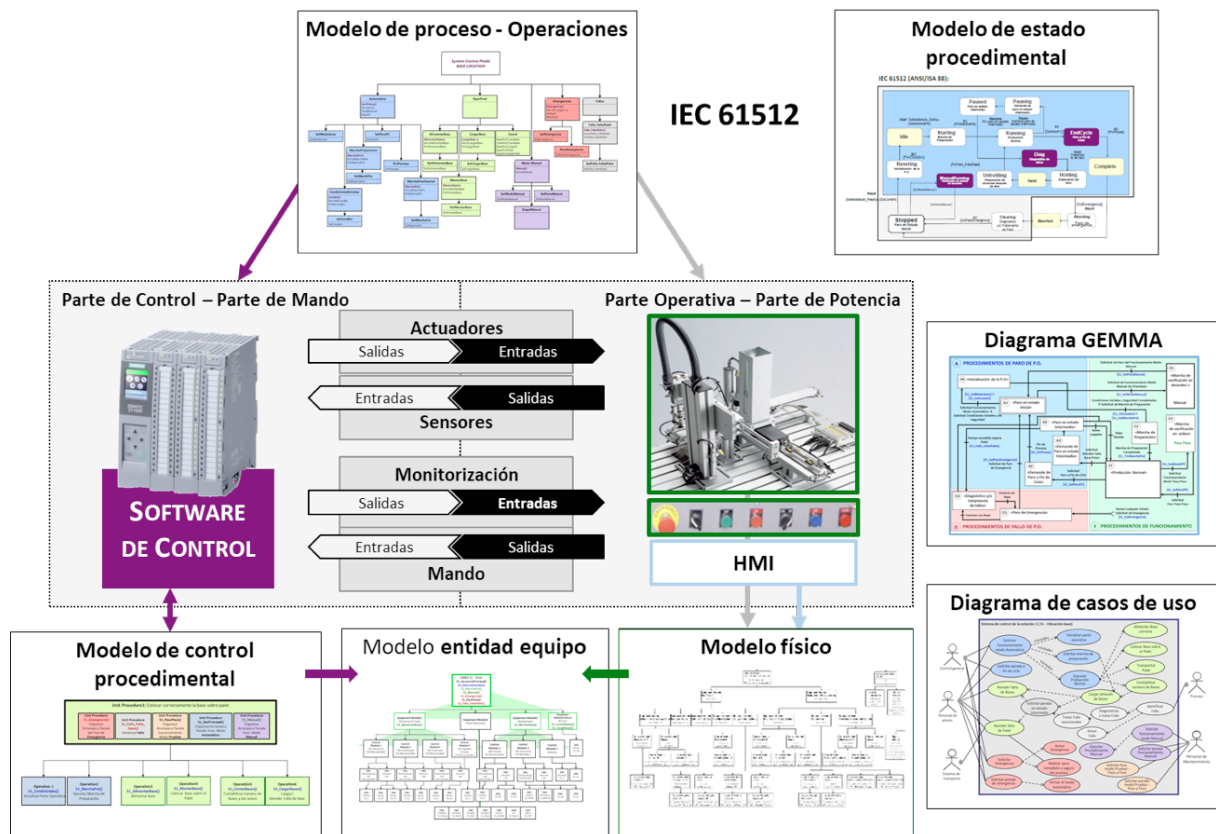


Figura 46
Modelos de análisis para el componente MeiA de la unidad de trabajo S1 - Ubicación Base

4.2. Diseño de la arquitectura del componente MeiA

La arquitectura del componente MeiA (figura 3) comprende la información de estado almacenada en dos modelos y los procedimientos que realizan todas las operaciones del software de control. El modelo de integración (MI) recopila el estado de la unidad de trabajo y sus conexiones con el entorno (HMI, WWW, panel de operaciones y otros procesos), mientras que el modelo del sistema de control (MSC) almacena el estado de su software de control. Estos dos modelos estructuran toda la información relacionada con el componente.

Todas las entradas al componente actualizan el modelo de integración. Concretamente:

- Las entradas del proceso de producción actualizan la información de los sensores.
- Las entradas de mando del panel de operación y la HMI modifican las señales de mando asociadas.
- Las entradas de otros sistemas que interactúan con el componente pueden ser: (1) solicitudes de servicio de operaciones de producción o auxiliares que requieren la ejecución de procedimientos, (2) información de coordinación entre componentes que permiten la ejecución o evolución de determinadas operaciones realizadas en colaboración, o (3) señales de mando de componentes con un nivel jerárquico superior responsables de la ejecución del proceso de producción.

En lo que respecta a las salidas del componente se distinguen tres destinos:

- Las salidas hacia los actuadores, los indicadores del panel de operación y la HMI, todos ellos en el lado operativo, se actualizan con información del modelo de integración.
- Las salidas hacia otros sistemas son proporcionadas por el modelo del sistema de control. Por ejemplo, los datos necesarios para informar a una aplicación de nivel superior.
- Las salidas requeridas en monitorización se obtienen de ambos modelos.

Los procedimientos, definidos en el modelo de control procedimental, modifican u obtienen información de los dos modelos en función del tipo de operación. Estos procedimientos corresponden no solo a operaciones de decisión, producción y auxiliares, sino también al gemelo funcional que simula el comportamiento de la unidad controlada por el componente.

El acceso a los dos modelos, tanto para actualizar como para obtener información, está restringido en función del dispositivo o componente con el que interactúa.

La figura 47 muestra la arquitectura del componente MeiA para la unidad S1. Por un lado, el modelo de integración incluye el modelo físico de la unidad, el panel de operación, la HMI, dos procesos de negocio a través de clientes WWW y OPC UA [48], y el control general de célula. El modelo físico comprende dos módulos de equipo: el alimentador base con su almacén y el manipulador de dos ejes con una ventosa.

Por otro lado, el modelo del sistema de control reúne las operaciones de los diferentes modos de funcionamiento (automático, manual, fallos y emergencia), los procedimientos que los implementan y las señales de control asociadas. También incluye la información relacionada con el modo de funcionamiento virtual (gemelo funcional) de la unidad.

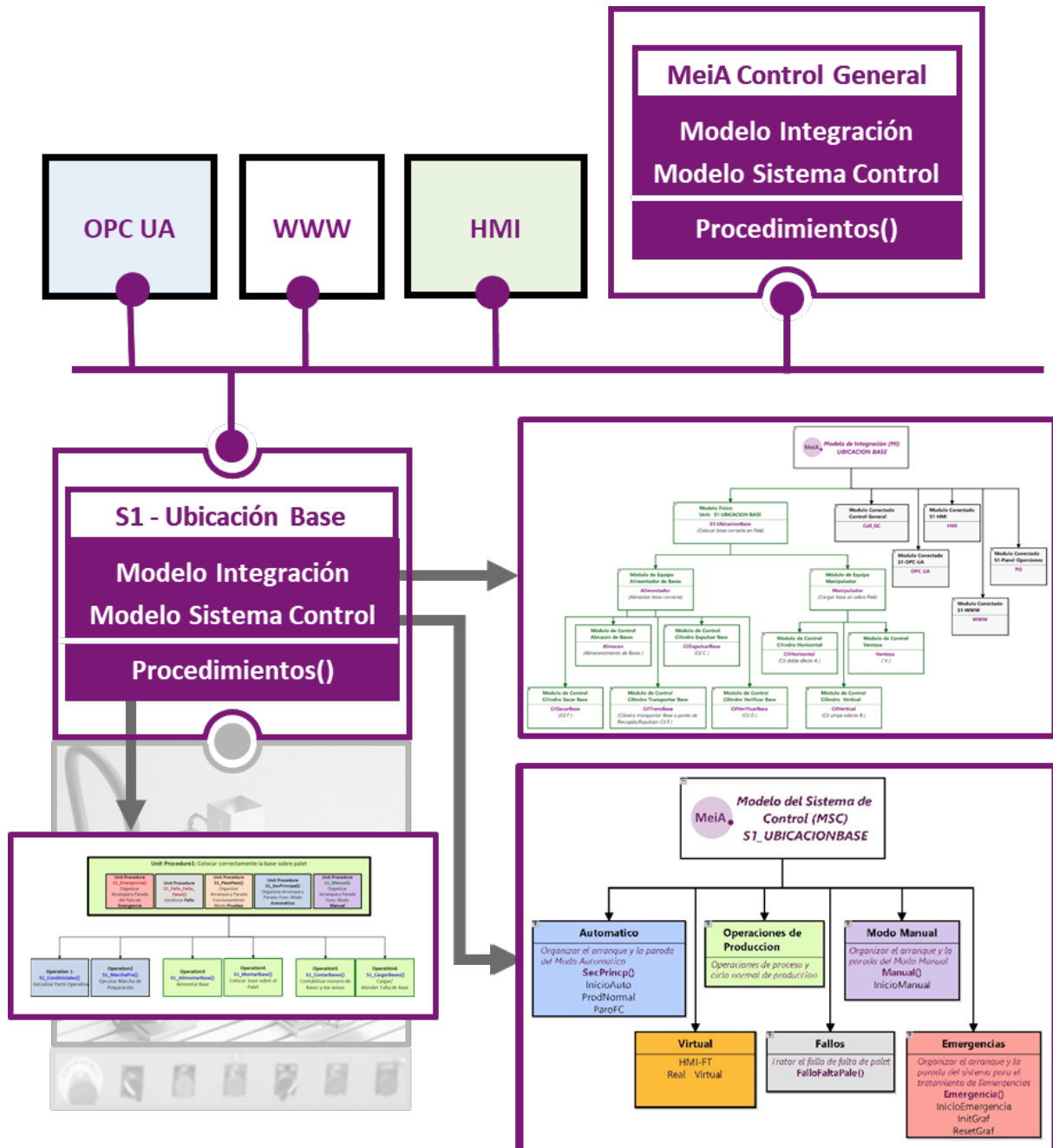


Figura 47

Arquitectura del componente MeIA que controla la unidad S1

4.3. Diseño detallado del componente MeIA

El diseño detallado establece las especificaciones que guiarán la implementación de los procedimientos ya identificados que realizarán las operaciones (las DOU de decisión, de producción y auxiliares expresadas en el lenguaje de modelado GRAFCET), los modelos de información del componente MeIA y el gemelo funcional de la unidad. Los pasos del diseño se detallan a continuación.

Diseño detallado de las DOU

Cada fase de análisis proporciona plantillas para los graficets de decisión que deben personalizarse a través de los pasos de análisis de los diferentes modos de funcionamiento. Aunque no hay plantillas para las DOU de producción y auxiliares, las DOU de decisión proporcionan las señales de coordinación para las DOU auxiliares y las señales utilizadas en las DOU de producción. La figura 48 presenta la plantilla personalizada de la DOU «Secuencia principal», que define el inicio y la parada del modo de funcionamiento automático de la unidad S1.

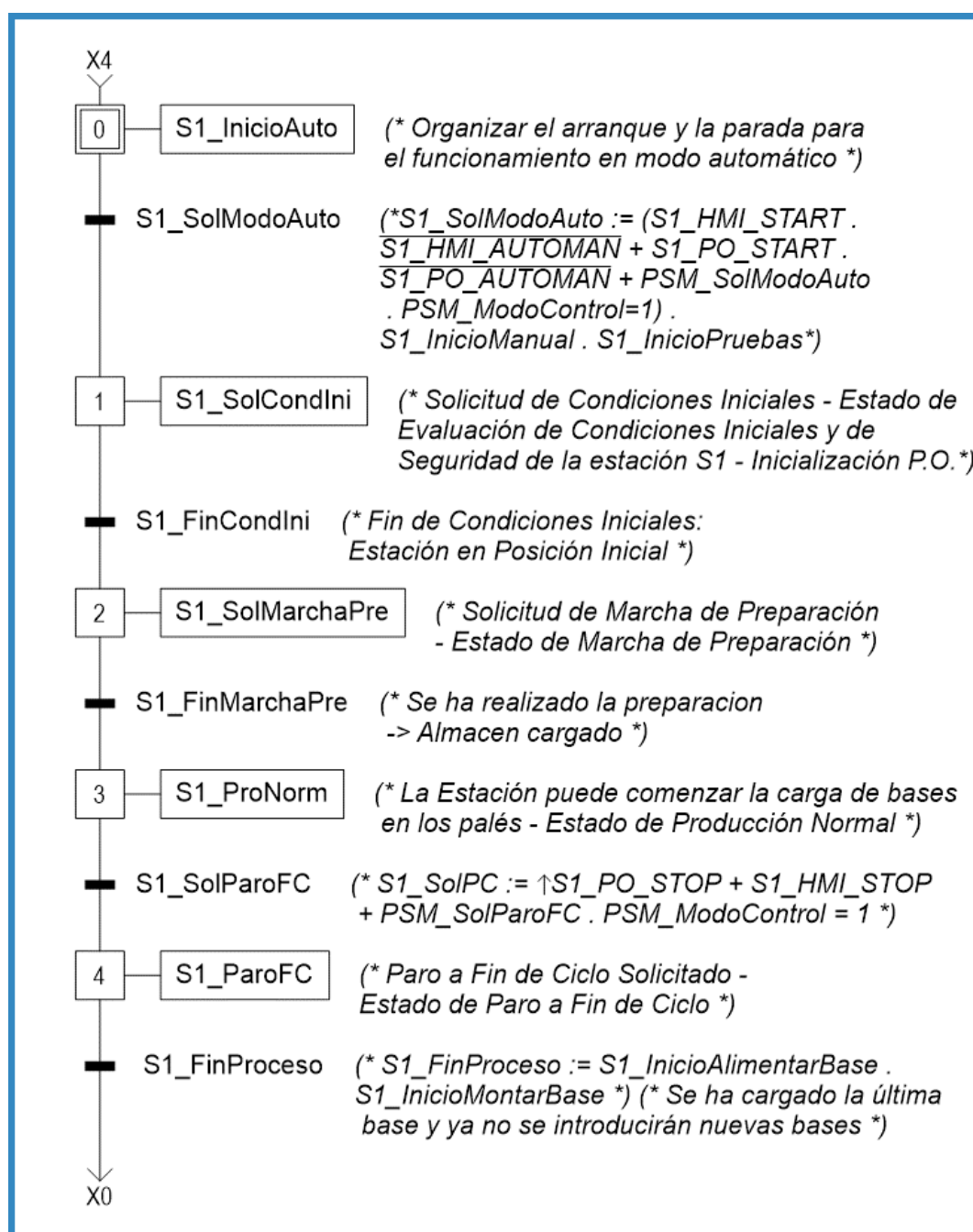


Figura 48

DOU de decisión «Secuencia principal» (Fase I)

Las figura 49 corresponden a las DOU auxiliares de dicho modo de funcionamiento. Las figuras 51-54 corresponden a las DOU de producción. Las figuras 55-57 presentan las DOU de los modos emergencia, manual y fallos respectivamente.

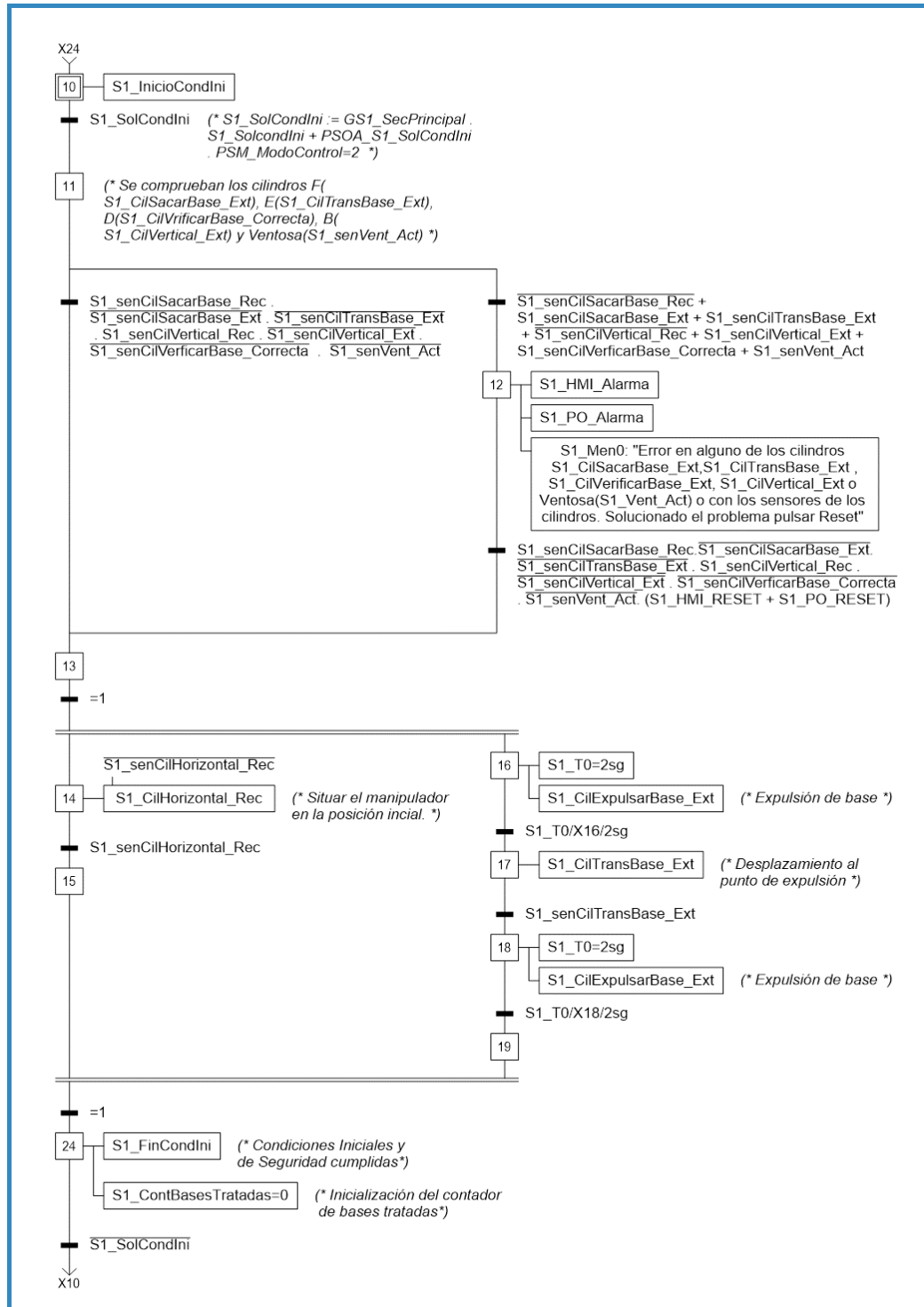


Figura 49

DOU auxiliar «Condiciones iniciales» (Fase I)

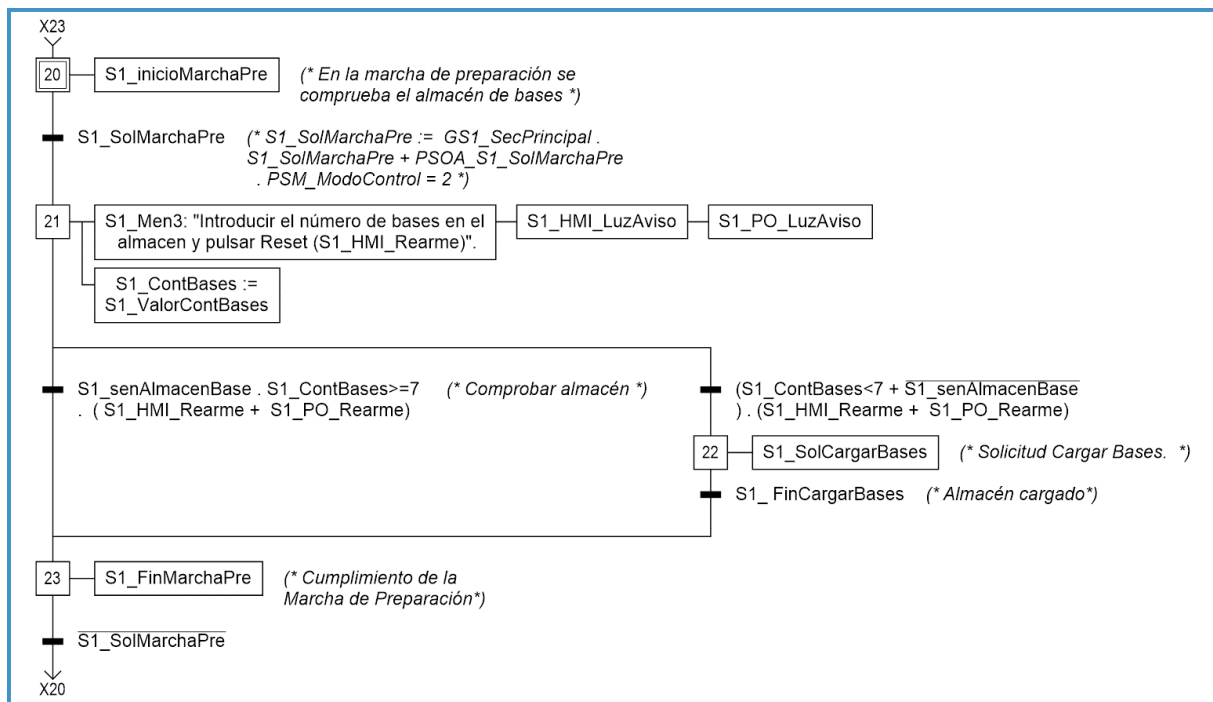


Figura 50
DOU auxiliar «Marcha de preparación» (Fase I)

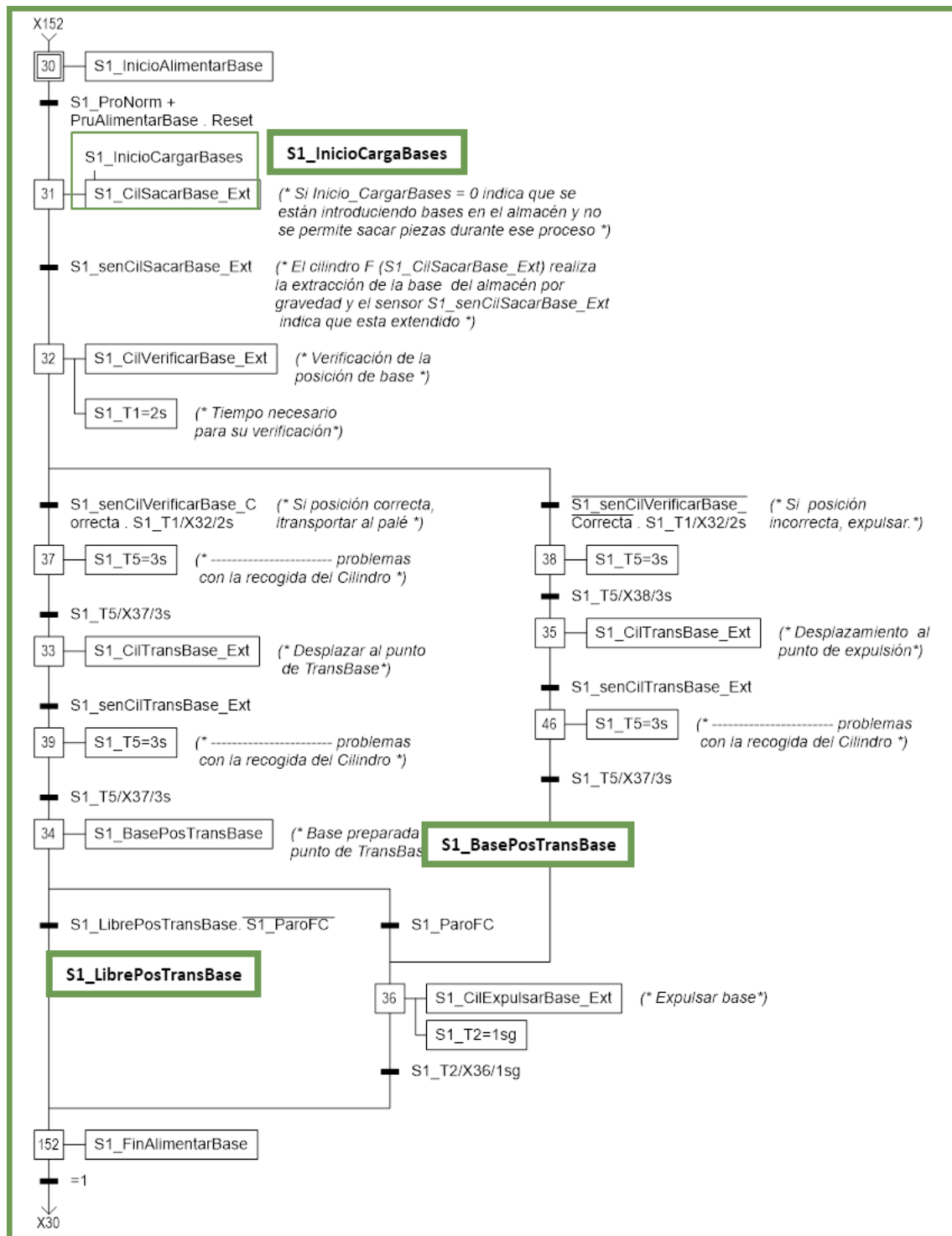


Figura 51
DOU de producción «Alimentar base correcta» (Fase VI)

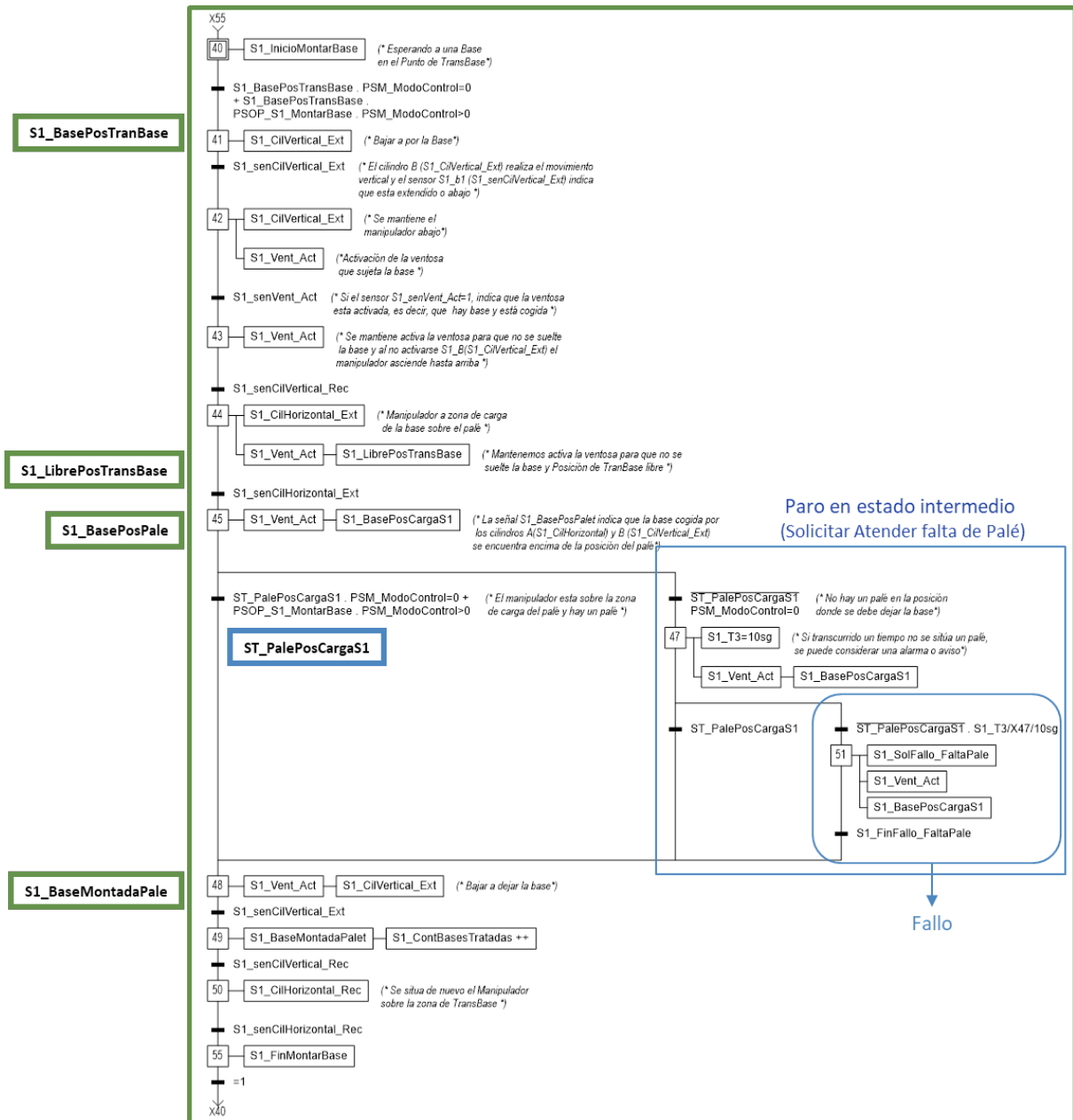


Figura 52

DOU de producción «Montar base sobre el palé» (Fase VI)

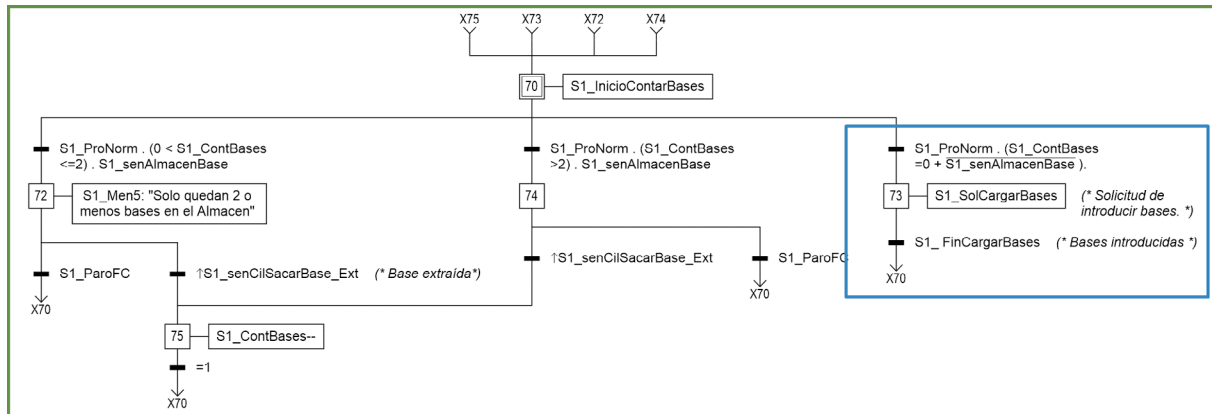


Figura 53

DOU de producción «Contabilizar número de base» (Fase VI)

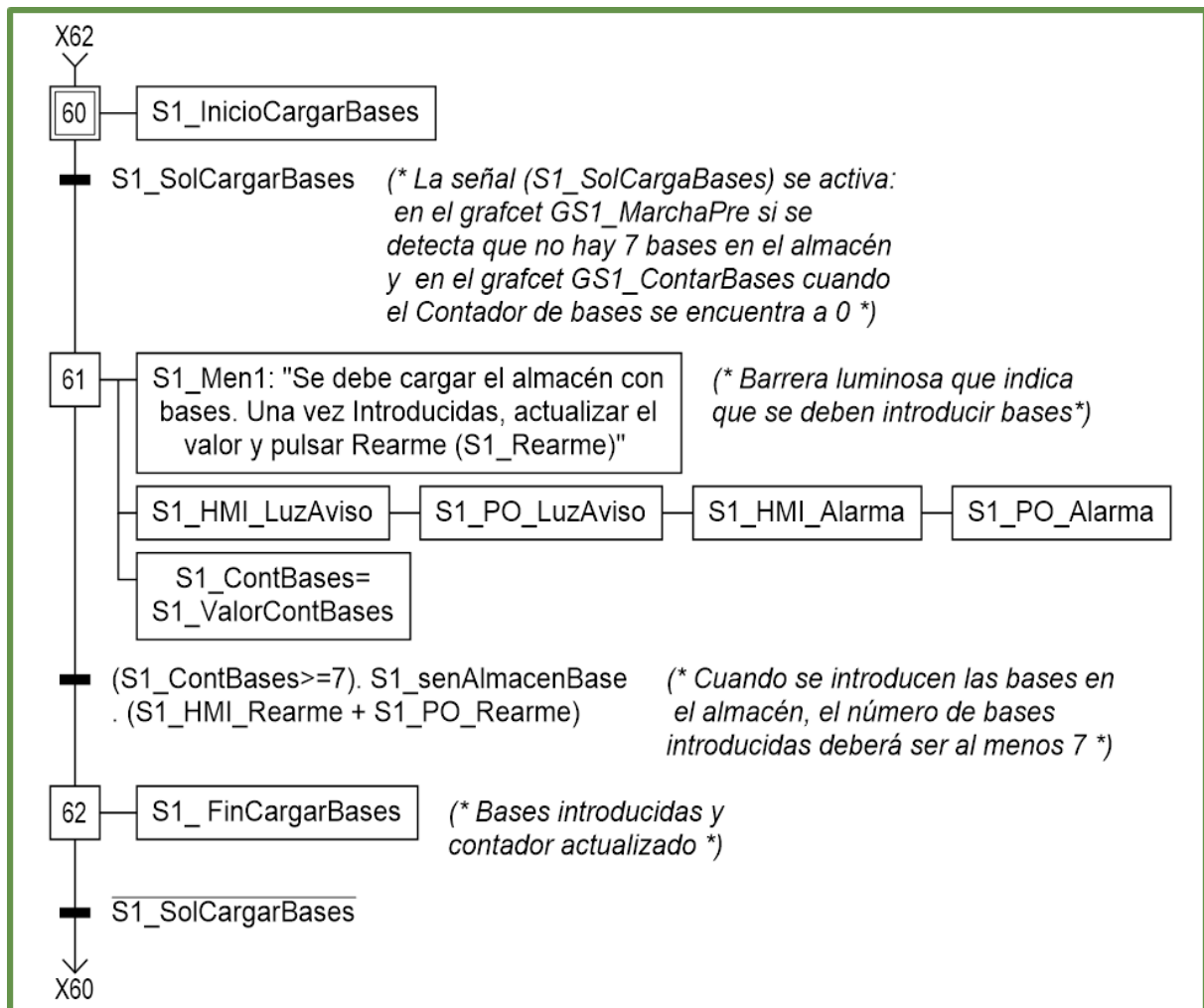


Figura 54

DOU de producción «Cargar/atender falta de base» (Fase VI)

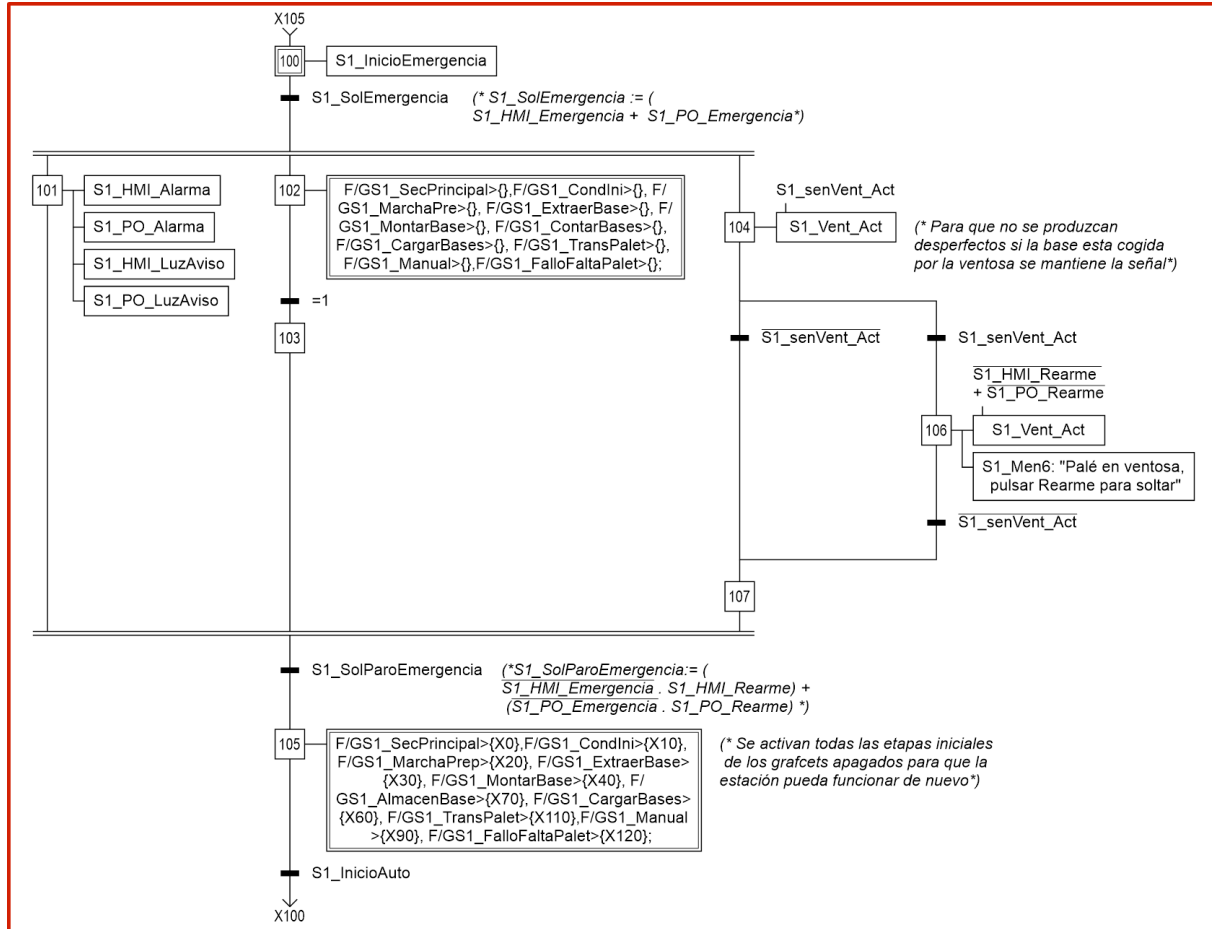


Figura 55

DOU de decisión «Emergencia» (Fase V)

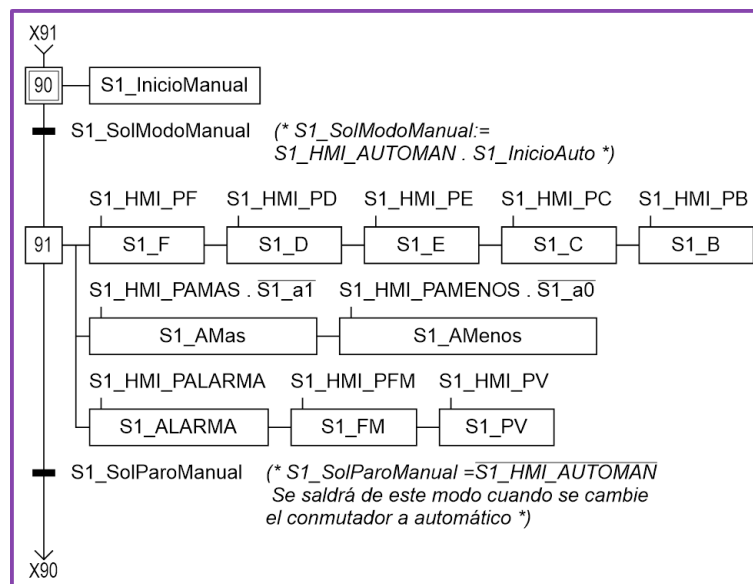


Figura 56

DOU de decisión «Modo manual» (Fase II)

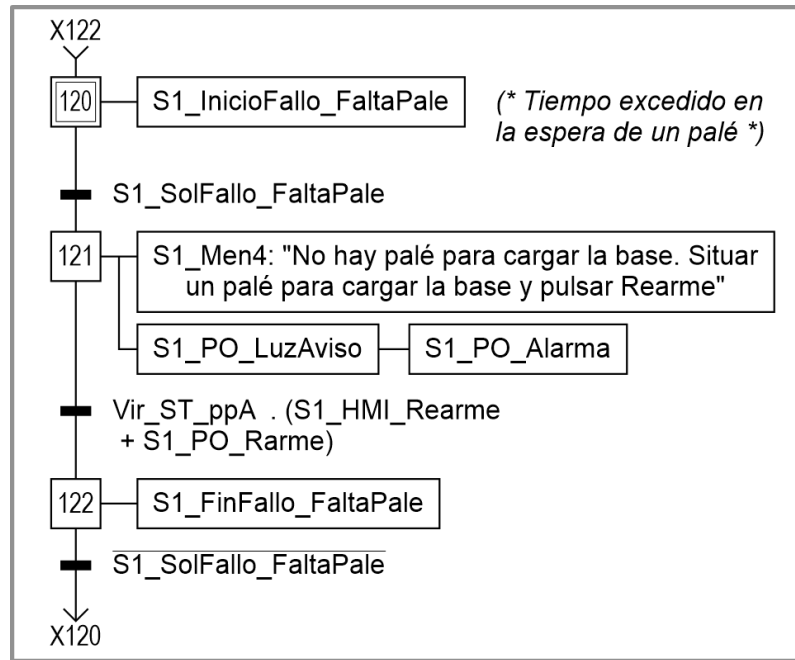


Figura 57

DOU «Fallo por falta de palé» (Fase IV)**Diseño detallado del modelo del sistema de control**

El modelo del sistema de control agrupa las operaciones del modelo de proceso por modos de funcionamiento e incluye los procedimientos que realizan estas operaciones del modelo de control procedimental y las señales de control asociadas. Por lo tanto, este modelo proporciona toda la información relativa al software de control:

- Información sobre los modos de funcionamiento (automático, manual, prueba, fallos y emergencia).
- Información sobre los estados de la unidad de trabajo (de acuerdo con la guía GEMMA, parada en estado inicial, marcha de preparación, producción normal, etc.).
- Información sobre las operaciones de producción (en curso, solicitadas o completadas) y el estado de las señales de coordinación utilizadas por estas operaciones.
- Información sobre advertencias o mensajes activados, temporizadores, contadores, etc.
- Información sobre el gemelo funcional de la unidad.

El modelo se construye de forma incremental a partir de las plantillas personalizadas como resultado del análisis de los distintos modos de funcionamiento. La figura 58 ilustra este modelo del componente MeiA de la unidad S1.

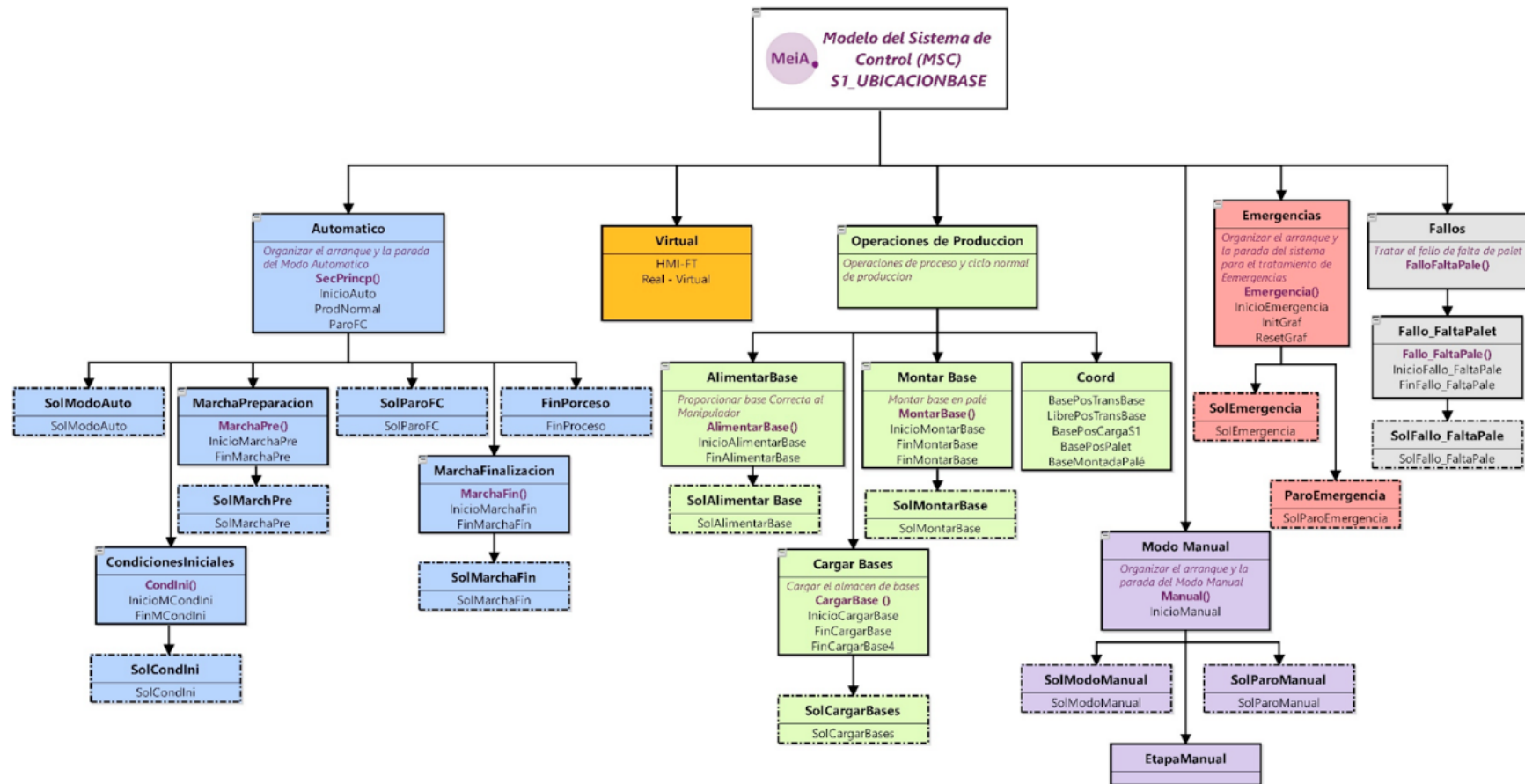


Figura 58
Modelo del sistema de control del componente MeiA

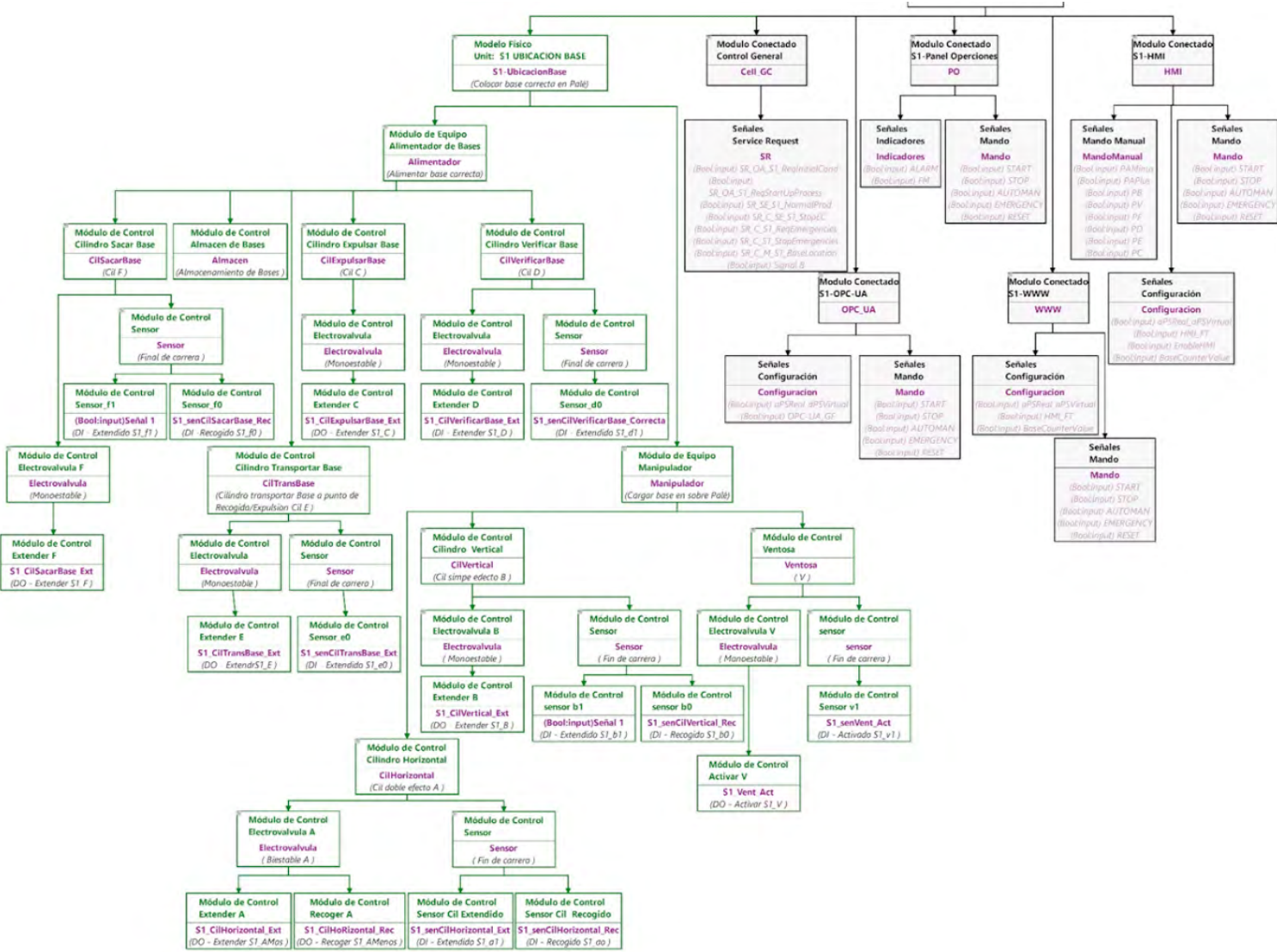


Figura 59

Modelo de integración del componente MeiA

Diseño detallado del modelo de integración

El modelo de integración incorpora el modelo físico de la unidad con todas sus señales y la información de los diferentes equipos o procesos que interactúan con el componente. Así, en el caso de la unidad S1, además de su modelo físico, se incluye toda la información sobre el panel de operación con sus señales de mando e indicadores, otros tres equipos con funciones de mando y/o monitorización (HMI, servidor web y cliente OPC-UA) y el componente MeiA del control general que solicita servicios al componente de la unidad. La figura 59 ilustra este modelo del componente MeiA para la unidad S1.

Diseño detallado del gemelo funcional

El gemelo funcional es un componente software que simula el comportamiento de la unidad de trabajo, respondiendo a las órdenes del componente MeiA (entradas de la unidad) con la activación de los sensores que simulan las salidas de la unidad. Por ello, el diseño del gemelo funcional precisa identificar los módulos de equipo y/o de control en el modelo físico para buscar los componentes funcionales básicos identificados en la biblioteca de componentes. En caso de no existir, se deberán desarrollar siguiendo los pasos descritos [9].

En la figura 60 se presenta el modelo físico de la unidad S1 que consta de dos módulos de equipo (manipulador y alimentador de bases) y ocho módulos de control (un cilindro de simple efecto, un cilindro de doble efecto y una ventosa del manipulador, y cuatro cilindros de simple efecto y un almacén por gravedad del alimentador).

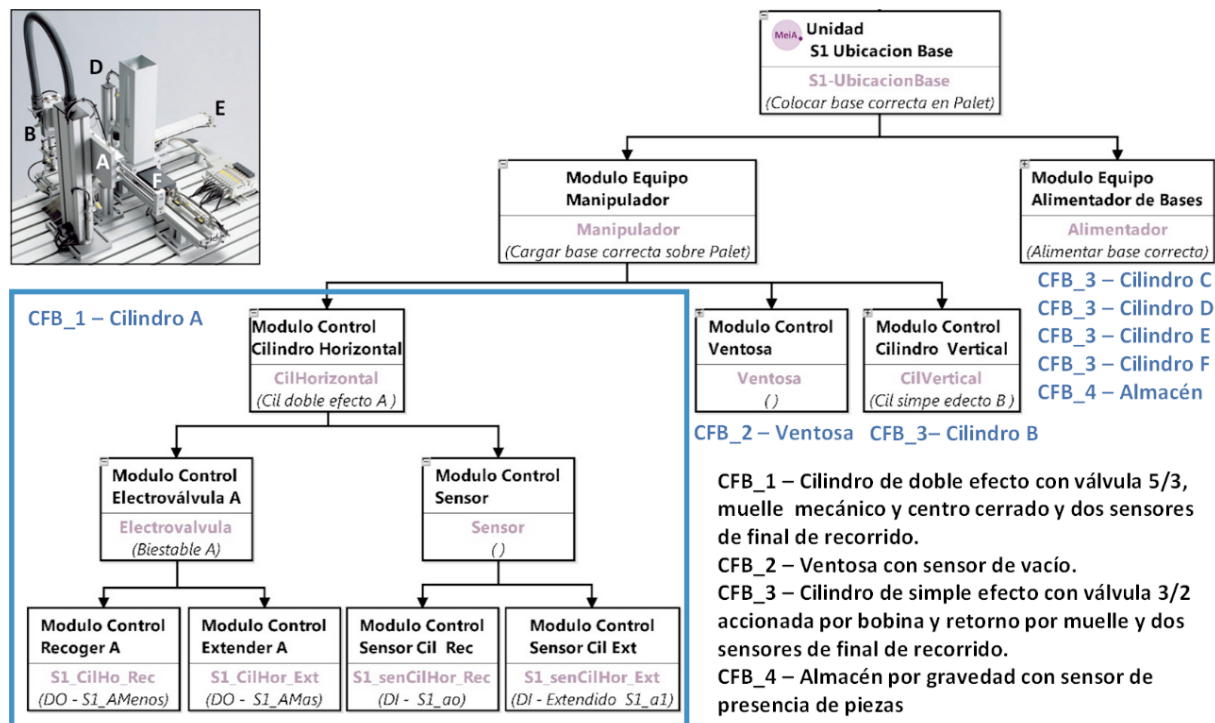


Figura 60

Identificación de los módulos de equipo y control en el modelo físico

Los componentes funcionales básicos asociados a los módulos de control identificados se encuentran en la biblioteca de componentes. Concretamente, serán necesarios cuatro tipos de componentes funcionales básicos, tal y como se muestra en la figura 61.



Figura 61

Componentes funcionales básicos seleccionados de la biblioteca de componentes

4.4. Implementación de un componente MeiA

Un componente MeiA se implementa mediante una Unidad de Organización de Programa (POU) de tipo Bloque Funcional (FB). Por lo tanto, es necesario crear la tabla de variables globales, definir la interfaz del FB para el componente, implementar las POU's relacionados con las DOUs de diseño y definir el cuerpo del FB del componente. A continuación, se describe la implementación en detalle.

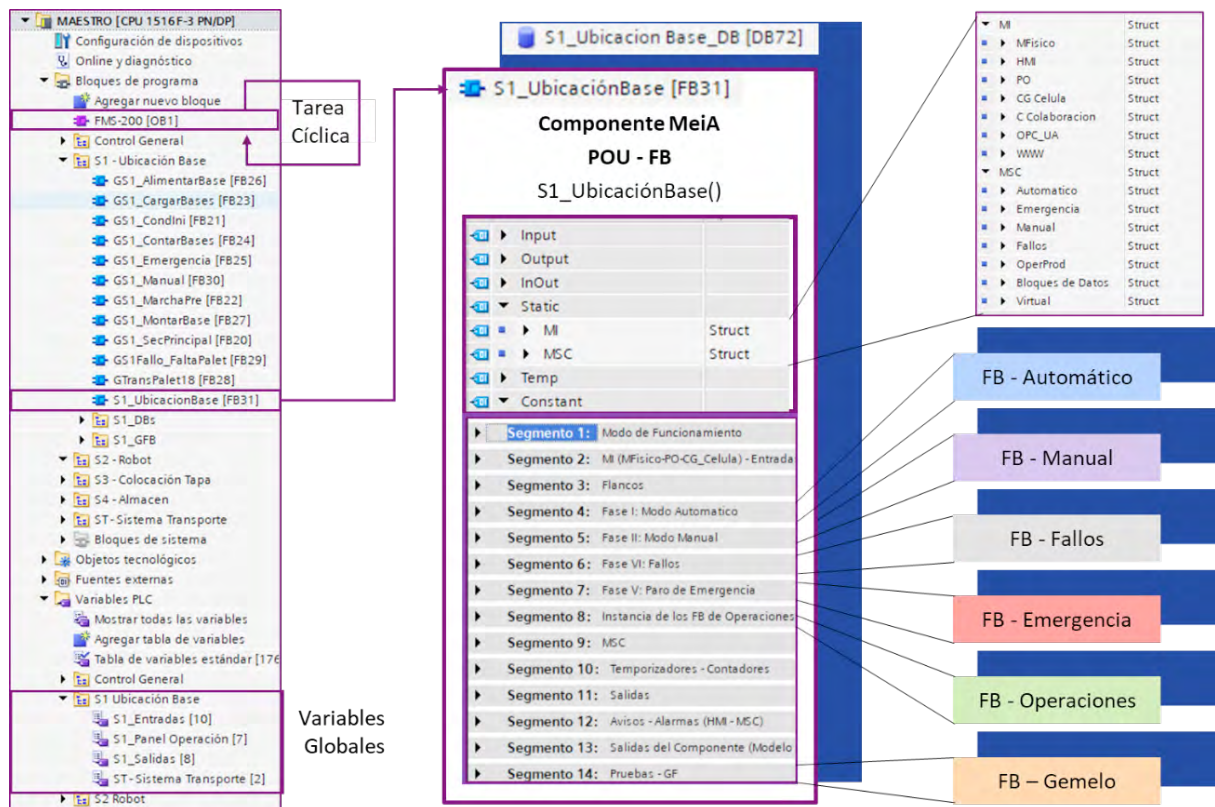


Figura 62

Implementación del componente MeiA de la unidad S1

La figura 62 presenta la POU de tipo FB correspondiente al componente MeiA de la unidad de trabajo S1 implementada en TIA Portal [15]. Sus modelos de integración y del sistema de control se definen como parámetros estáticos en la interfaz. El cuerpo, estructurado en segmentos, contiene las instancias de los FB de los procedimientos diseñados. El programa principal es una POU de tipo PROGRAM con ejecución cíclica, que corresponde al bloque de organización OB1 en Siemens, donde se instancia el componente.

Creación de la tabla de variables globales

Las variables globales (figura 63) corresponden a las entradas y salidas que están conectadas a la unidad de trabajo utilizando la nomenclatura de la planta.

...3 - 24-10-2023 ▶ MAESTRO [CPU 1516F-3 PN/DP] ▶ Variables PLC ▶ S1 Ubicación Base ▶ S1_Entradas [10]

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Acces...	Escrib...	Visibl...	Comentario
1	S1_a0	Bool	%I80.4	☒	☐	☒	Manipulador: Cilindro Horizontal Recogido
2	S1_a1	Bool	%I80.5	☒	☐	☒	Manipulador: Cilindro Horizontal Extendido
3	S1_b0	Bool	%I80.6	☒	☐	☒	Manipulador: Cilindro Vertical Recogido - Arriba
4	S1_b1	Bool	%I80.7	☒	☐	☒	Manipulador: Cilindro Vertical Extendido - Abajo
5	S1_v1	Bool	%I81.0	☒	☐	☒	Manipulador: Ventosa Activada
6	S1_e1	Bool	%I81.2	☒	☐	☒	Alimentador: Cilindro Transportar Base Extendido
7	S1_d1	Bool	%I81.1	☒	☐	☒	Alimentador: Cilindro de Verificación de la Base Extendido
8	S1_f0	Bool	%I81.3	☒	☐	☒	Alimentador: Cilindro Sacar Base Recogido
9	S1_f1	Bool	%I81.4	☒	☐	☒	Alimentador: Cilindro Sacar Base Extendido
10	S1_bp	Bool	%I81.5	☒	☐	☒	Almacen: Presencia de base en almacén

...ico - S1 - ST - S3 - 24-10-2023 ▶ MAESTRO [CPU 1516F-3 PN/DP] ▶ Variables PLC ▶ S1 Ubicación Base ▶ S1_Panel Operación [7]

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Acces...	Escrib...	Visibl...	Comentario
1	S1_EMERGENCIA	Bool	%I10.3	☒	☐	☒	Pendiente de ser Cableada
2	S1_START	Bool	%I80.0	☒	☐	☒	Panel de Operacion: Boton START (verde)
3	S1_STOP	Bool	%I80.1	☒	☐	☒	Panel de Operacion: Boton STOP (rojo)
4	S1_AUTOMAN	Bool	%I80.2	☒	☐	☒	Panel de Operacion: Conmutador AUTO/MAN → 0 AUTO 1 M...
5	S1_RESET	Bool	%I80.3	☒	☐	☒	Panel de Operacion: Boton RESET (azul)
6	S1_ALARM	Bool	%Q80.0	☒	☐	☒	Panel de Operación: Luz de Alarma (roja)
7	S1_FM	Bool	%Q81.1	☒	☐	☒	Proceso: Barra Luminosa

CG Jerarquico - S1 - ST - S3 - 24-10-2023 ▶ MAESTRO [CPU 1516F-3 PN/DP] ▶ Variables PLC ▶ S1 Ubicación Base ▶ S1_Salidas [8]

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Acces...	Escrib...	Visibl...	Comentario
1	S1_AMas	Bool	%Q80.1	☒	☐	☒	Manipulador: Retroceder Cilindro Horizontal
2	S1_AMenos	Bool	%Q80.2	☒	☐	☒	Manipulador: Extender Cilindro Horizontal
3	S1_B	Bool	%Q80.3	☒	☐	☒	Manipulador: Extender Cilindro Vertical
4	S1_V	Bool	%Q80.4	☒	☐	☒	Manipulador: Activar Ventosa
5	S1_C	Bool	%Q80.5	☒	☐	☒	Alimentador: Extender Cilindro Expulsar Base mal colocada
6	S1_D	Bool	%Q80.6	☒	☐	☒	Alimentador: Extender Cilindro Verificar Base
7	S1_E	Bool	%Q80.7	☒	☐	☒	Alimentador: Extender Cilindro Transportar Base punto Recogida/Expulsión
8	S1_F	Bool	%Q81.0	☒	☐	☒	Alimentador: Extender Cilindro Sacar Base

Figura 63

Variables globales del componente MeiA de la unidad S1

Definición de la interfaz del FB del componente MeIA

La definición de la interfaz requiere la declaración de (1) las entradas y salidas nombradas según su nomenclatura en el modelo de integración (figura 64), (2) variables estáticas de tipo estructura de los modelos de integración (figura 65) y del sistema de control (figura 66), y (3) otras variables temporales y constantes necesarias en la ejecución de los procedimientos del componente. Las variables de entrada son entradas procedentes de la unidad de trabajo (sensores, %I). Las variables de salida son salidas a la unidad de trabajo (actuadores, %Q).

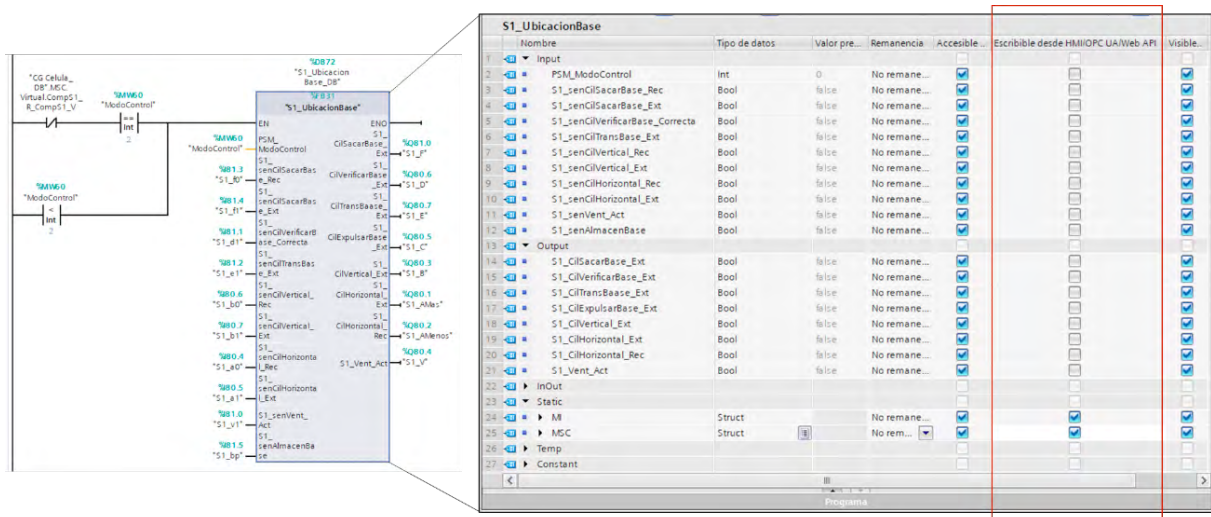


Figura 64

Entradas y salidas de la interfaz del FB

S1_UbicacionBase						
Nombre	Tipo de datos	Valor pre...	Remanencia	Accesible ..	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visibl...
1	Input					
2	Output					
3	InOut					
4	Static					
5	MI	Struct	No remane...			
6	MFisico	Struct	No remane...			
7	Alimentador	Struct	No remane...			
8	CilSacarBase	Struct	No remane...			
9	CilVerificarBase	Struct	No remane...			
10	CilTransBase	Struct	No remane...			
11	CilExpulsarBase	Struct	No remane...			
12	Almacen	Struct	No remane...			
13	Manipulador	Struct	No remane...			
14	CilVertical	Struct	No remane...			
15	CilHorizontal	Struct	No remane...			
16	Ventosa	Struct	No remane...			
17	HMI	Struct	No remane...			
18	PO	Struct	No remane...			
19	CG Celula	Struct	No remane...			
20	C Colaboracion	Struct	No remane...			
21	OPC_UA	Struct	No remane...			
22	WWW	Struct	No remane...			
23	MSC	Struct	No rem...			
24	Temp					
25	Constant					

Ruta de llamada: Componentes CG [OB1]

Figura 65

Variable estática del modelo de integración

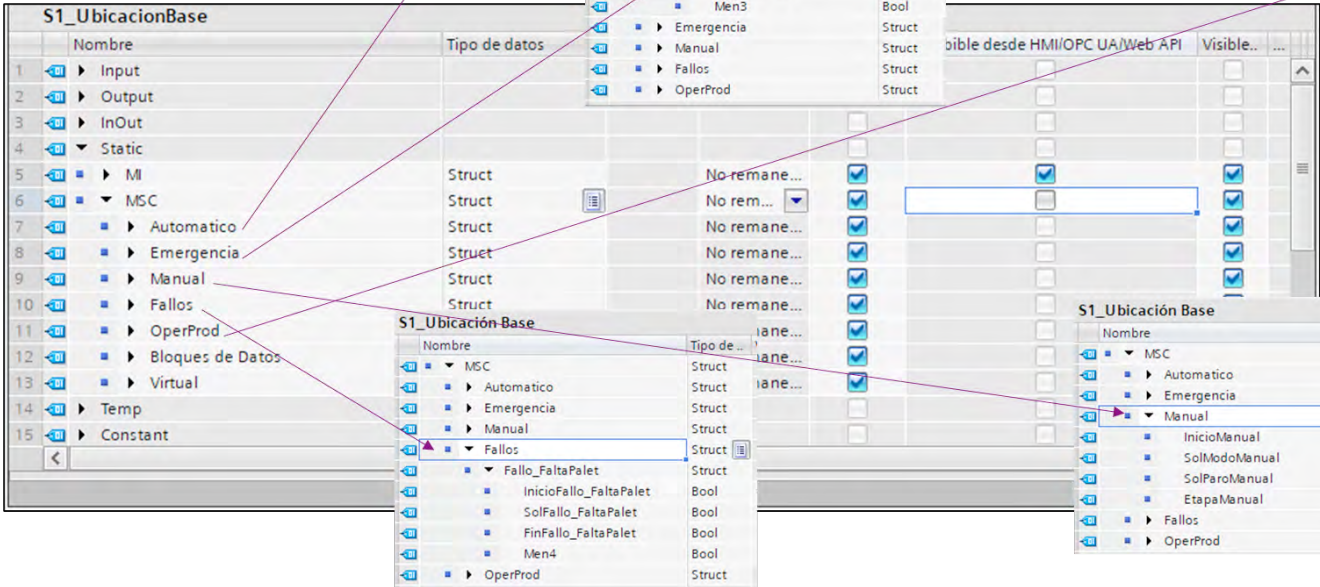


Figura 66

Variable estática del modelo del sistema de control

Implementación de un FB por cada DOU diseñado

Para cada DOU se desarrolla una POU de tipo FB (figura 67) a partir de su diseño detallado, teniendo en cuenta los datos de los modelos del sistema de control y de integración. Estos FB abordan la parte secuencial que proporciona la evolución del grafcet, es decir, la secuencia de activación y desactivación de las diferentes etapas.



Figura 67

Las POU de las DOU diseñadas

Las POUs asociadas a operaciones (de producción y/o auxiliares) tienen señales de solicitud, inicio y fin declaradas en su interfaz de bloque, así como dos señales para su activación y su desactivación (Init y Reset). Las POUs correspondientes a las DOUs de decisión son reutilizables.

La programación de estas POU se puede realizar en cualquier lenguaje de programación de la norma IEC 61131-3, pero la opción más intuitiva es utilizar el lenguaje SFC, ya que sería una correspondencia casi directa con los diseños realizados en GRAFCET.

Implementación de un FB para el gemelo funcional

La figura 68 presenta la POU correspondiente al gemelo funcional. La interfaz del FB contiene la declaración de (1) las entradas correspondientes a las salidas del componente MeiA que activan los actuadores para ejecutar las acciones en la unidad de trabajo; y (2) las entradas/salidas del gemelo funcional correspondientes a las entradas del componente MeiA que informan del estado de la unidad de trabajo.

El cuerpo del FB contiene las instancias de los FB relacionados con los componentes funcionales básicos identificados en la etapa de diseño y sus conexiones con las entradas/salidas del gemelo funcional. El cuerpo se puede programar en texto estructurado (ST) o diagrama de contactos (LD).

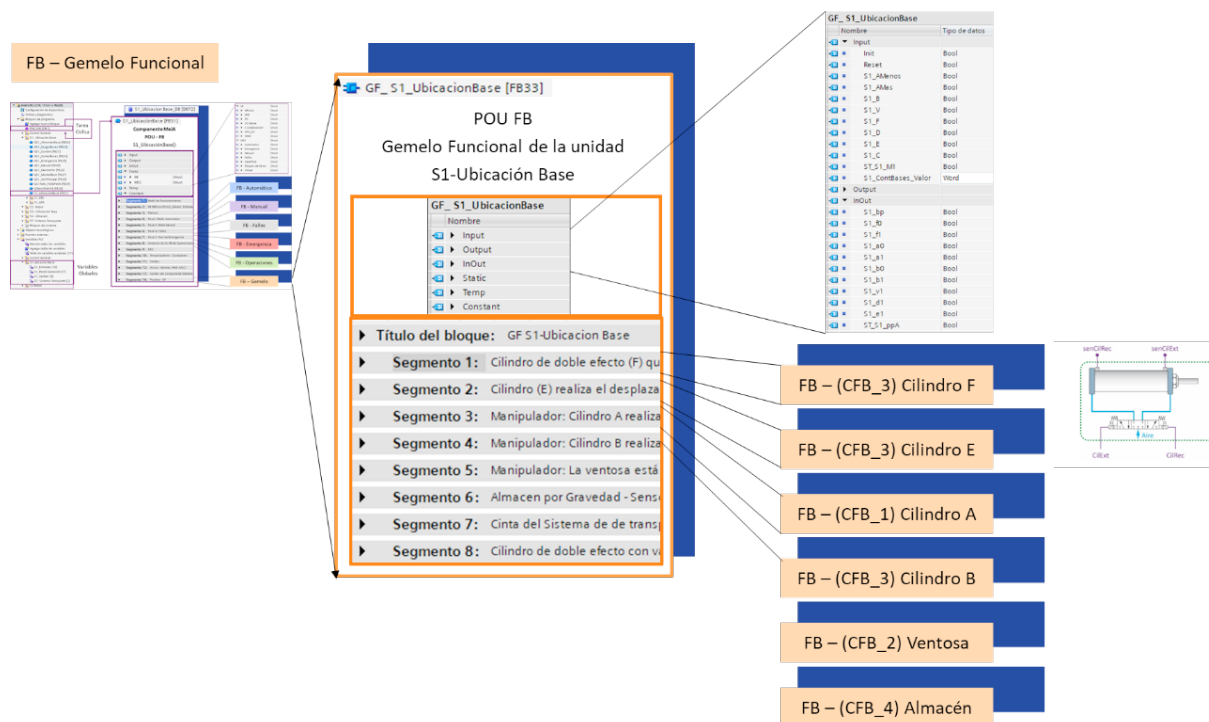


Figura 68
POU para el gemelo funcional

Estos componentes funcionales básicos trabajan con el tiempo empleado en realizar acciones en la unidad de trabajo. Por ejemplo, tiempo para avanzar o retroceder un cilindro, tiempo para mover una pieza de una posición a otra dentro de la unidad de trabajo, etc. Sin embargo, estos tiempos pueden modificarse durante las pruebas para facilitar la inspección de la ejecución de las operaciones.

Implementación del cuerpo del FB del componente MeiA

El cuerpo del FB se puede programar en cuatro de los cinco lenguajes de programación propuestos por la norma IEC 61131-3: diagrama de contactos (LD), diagrama de bloques de función (FBD), texto estructurado (ST) o lista de instrucciones (IL). Independientemente del lenguaje de programación elegido, la funcionalidad del componente se integra en el cuerpo teniendo en cuenta los siguientes pasos:

1. Preparación del componente MeiA para trabajar con el gemelo funcional. El componente requiere una señal de conmutación para seleccionar entre trabajar con la unidad de trabajo real o con su gemelo funcional (figura 69). Dicha señal está almacenada en una estructura en el modelo del sistema de control junto con las variables de memoria utilizadas para la simulación de las entradas de la unidad controlada.
2. Asignación de las entradas tanto de la unidad de trabajo como del panel de operación al modelo de integración. Las entradas se conmutan según se esté trabajando con la unidad real o con el gemelo funcional.

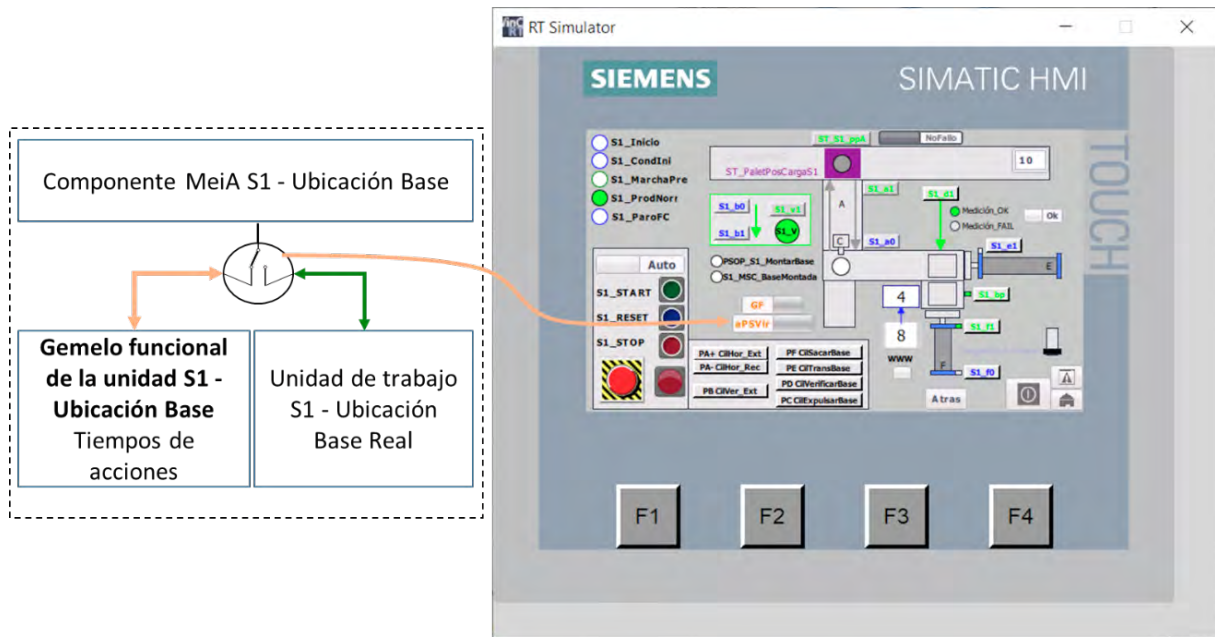


Figura 69

Conmutación entre la unidad de trabajo real y su gemelo funcional

3. Para cada modo de operación se actualizan las señales de control en el modelo del sistema de control y se instancian los FB de decisión y auxiliares asociados.
4. Para cada operación de producción se actualizan las señales de control en el modelo del sistema de control y se instancian los FB asociados a las DOU de producción identificadas.
5. Las operaciones de producción que modifican la información de actuadores, coordinación y otras señales de salida se actualizan en el modelo de integración.
6. Asignación de los valores del modelo de integración a las salidas del componente de la unidad de trabajo.
7. El FB del gemelo funcional de la unidad de trabajo se instancia en el cuerpo del FB del componente.

Estos pasos cubren los aspectos básicos para el desarrollo del cuerpo del FB (figura 70). Sin embargo, puede ser necesario incorporar otros pasos dependiendo de la funcionalidad del componente.

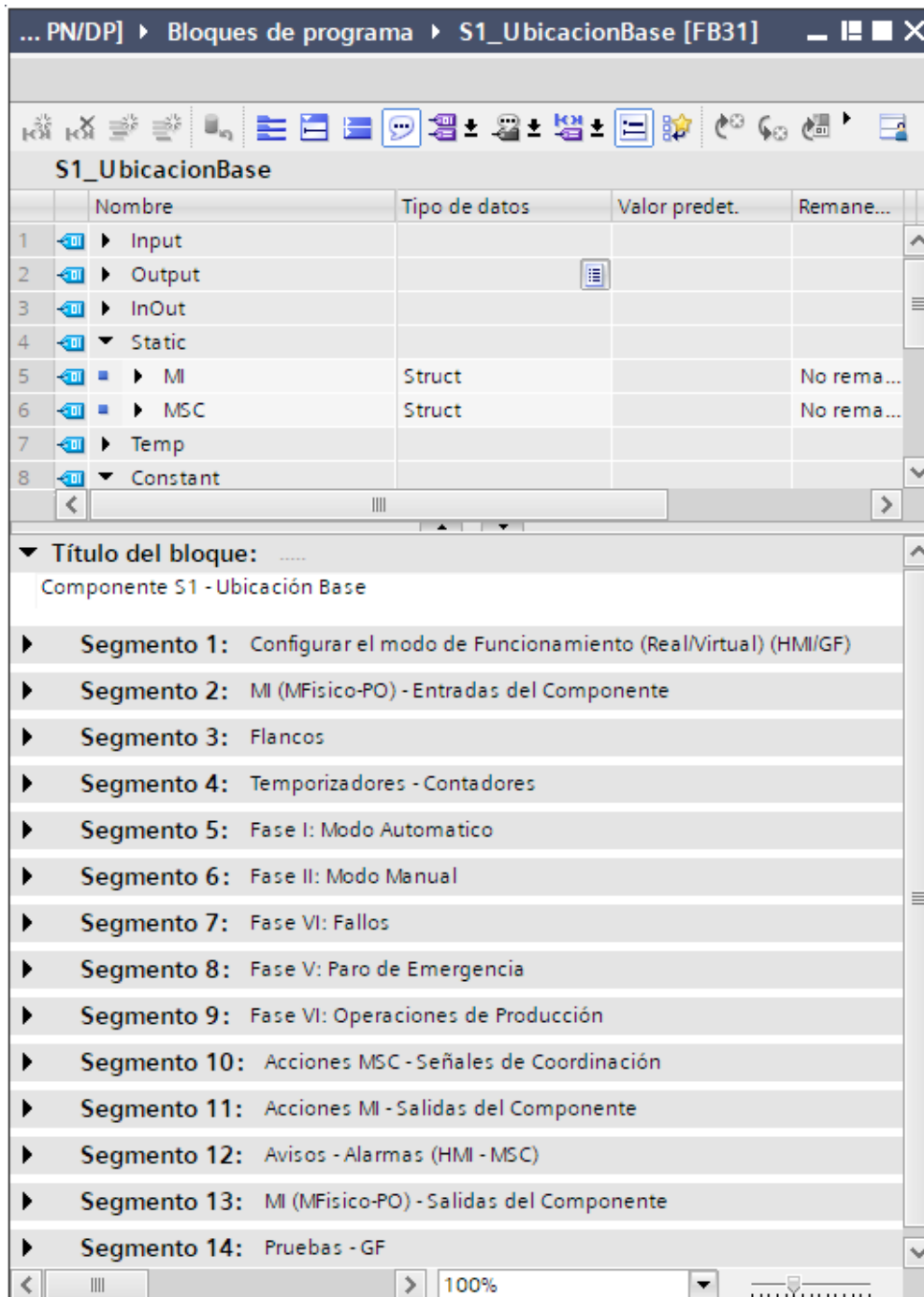


Figura 70

Cuerpo del FB para el componente MeiA

4.5. Pruebas del componente MeiA

Al componente MeiA se le realizan pruebas unitarias, pruebas de integración, y pruebas de verificación y validación.

Pruebas unitarias

Los sistemas de simulación que ofrecen los entornos de programación de PLC y la HMI se han utilizado como herramientas para realizar las pruebas unitarias. Ambas herramientas permiten la activación de las entradas del software (salidas de la unidad de trabajo asociadas a los sensores y controles de mando) y la visualización de todas las señales. Así, permiten comprobar la activación y desactivación de cada una de las etapas (pruebas estructurales de la parte secuencial), como en el ejemplo de la figura 71, la ejecución de las acciones asociadas a las etapas activadas (pruebas funcionales de la parte combinacional), y la funcionalidad de la POU (pruebas funcionales del correcto funcionamiento del procedimiento). También se ha utilizado el gemelo funcional para la realización de estas pruebas unitarias.

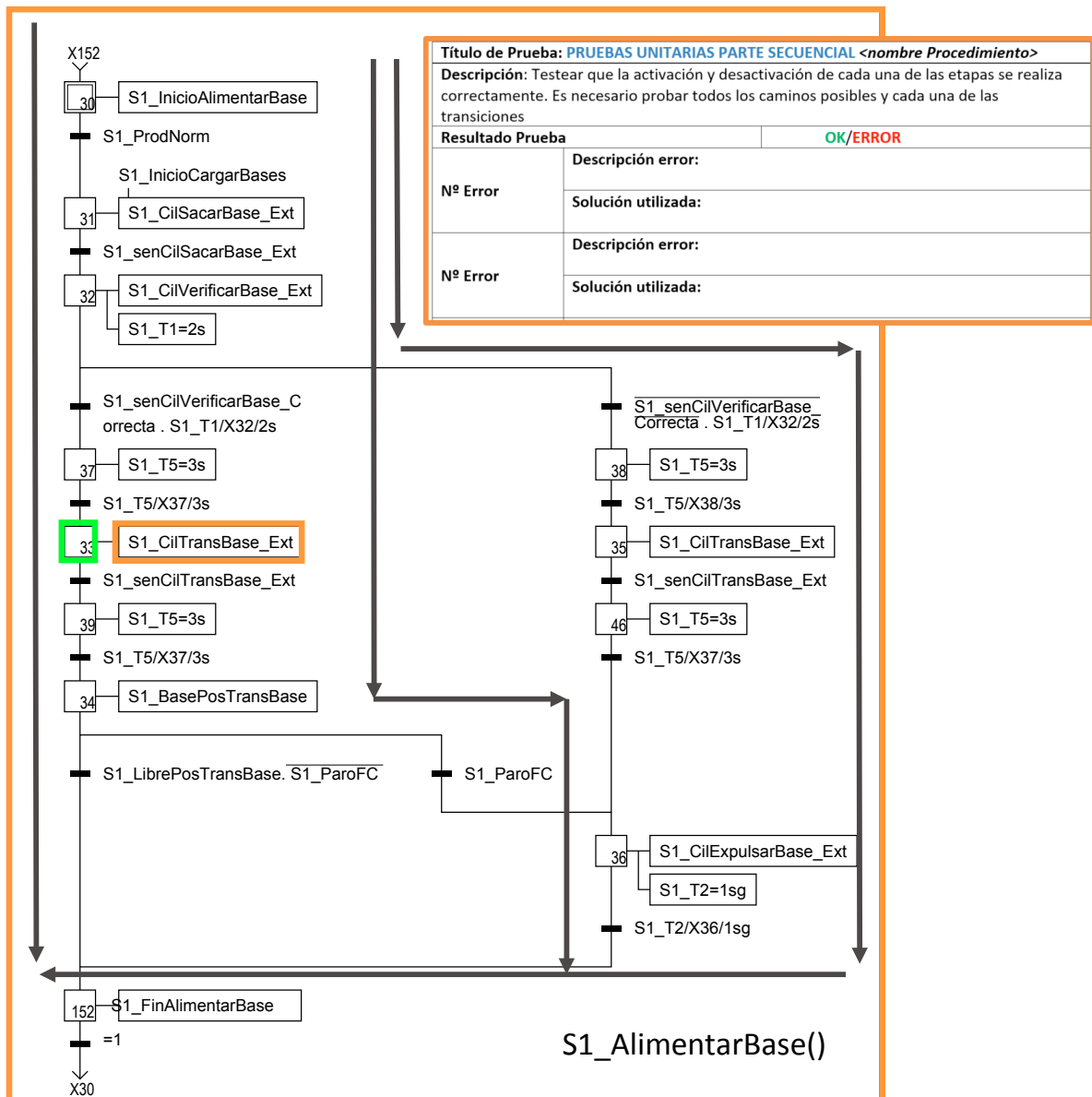


Figura 71

Pruebas estructurales de la parte secuencial de la POU «S1_AlimentarBase»

Pruebas de integración

El gemelo de la unidad de trabajo se ha utilizado como herramienta de pruebas de integración. Este componente de software responde a los mandos del componente MeiA (entradas a la unidad de trabajo) activando las entradas correspondientes (salidas de la unidad de trabajo). Por tanto, permite comprobar las señales de coordinación entre las POU de los distintos modos de funcionamiento (pruebas estructurales de sincronización), como en el ejemplo de la figura 72, y las pruebas funcionales de las operaciones que se realizan en cada estado y de las operaciones que se realizan en paralelo (figura 73).

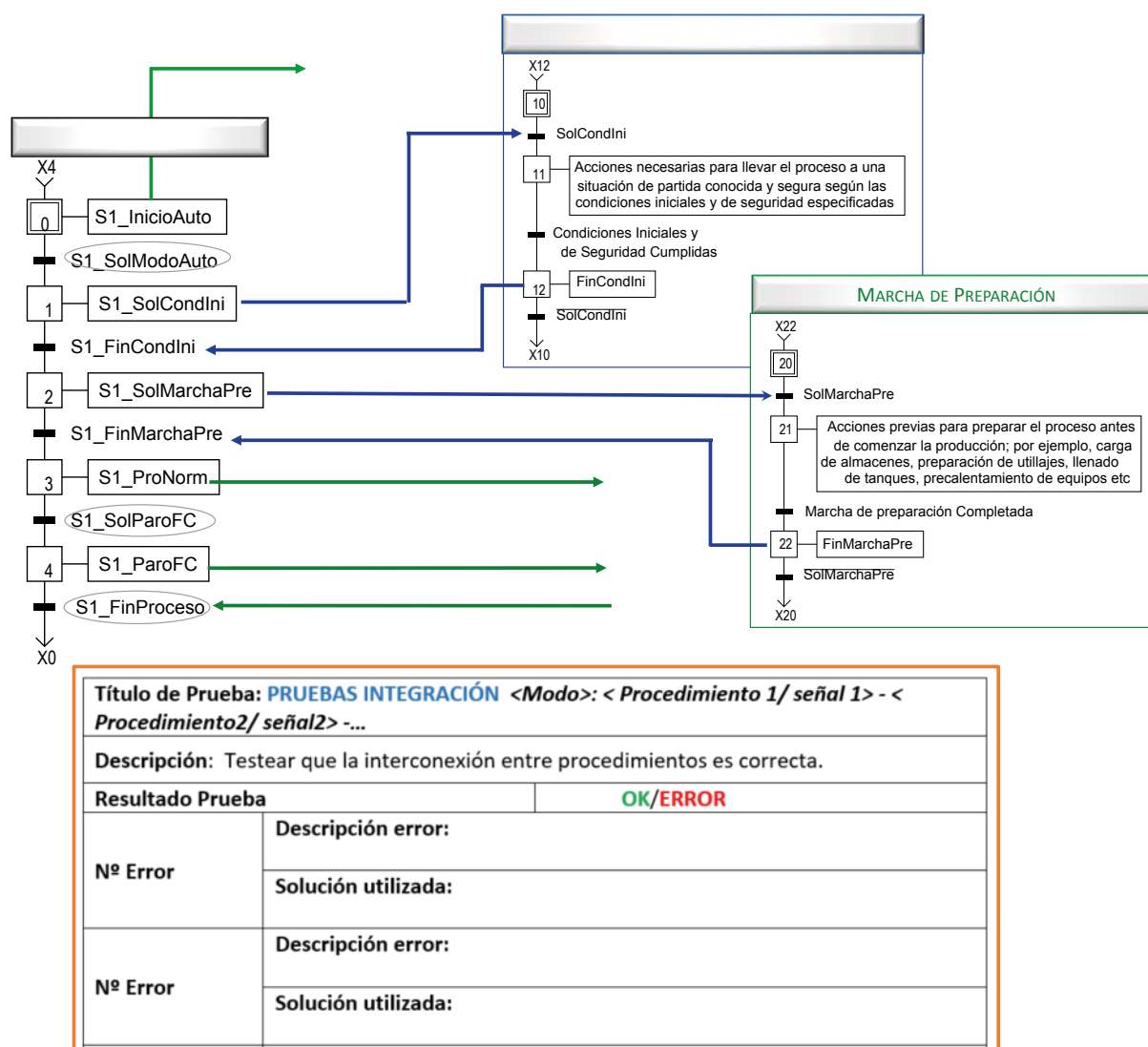


Figura 72

Pruebas estructurales de sincronización de la POU «S1_SecPrincipal»

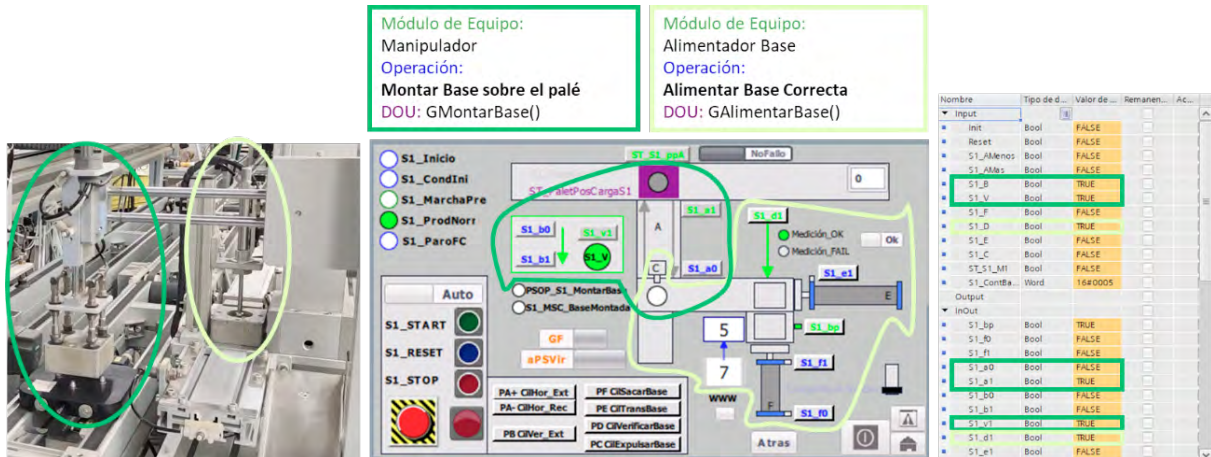


Figura 73

Pruebas funcionales de las operaciones realizadas en paralelo

Pruebas de verificación y validación

Como herramienta de pruebas de verificación y validación se ha utilizado el gemelo funcional de la unidad de trabajo. La puesta en marcha virtual ha permitido probar el sistema de control en simulación, comprobando que cumple los requisitos funcionales y no funcionales (pruebas de verificación), así como los requisitos de las partes interesadas (pruebas de validación). El conjunto de casos de prueba se ha ampliado significativamente por la capacidad del gemelo funcional para inyectar fallos.

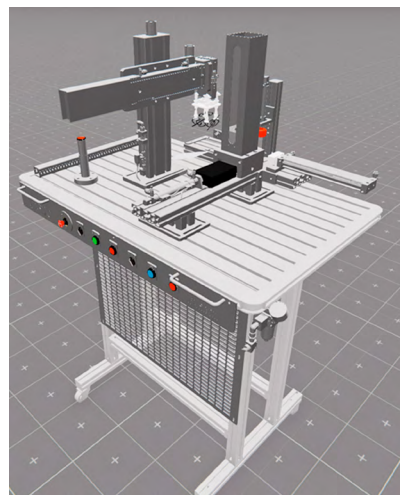


Figura 74

Gemelo digital de la unidad S1-Ubicación base

Estas pruebas también se han realizado utilizando el gemelo digital de la unidad de trabajo S1-Ubicación base (figura 74), desarrollo con el software Machines Simulator [16]. Este gemelo digital también permite la inyección controlada de fallos para evaluar el comportamiento del sistema en los distintos escenarios.

Capítulo 5

Desarrollo de un componente MeiA para el control de célula

Los pasos de desarrollo de un componente MeiA que realiza el control jerárquico de una célula (figura 75) se ilustrarán mediante la construcción del componente MeiA del control general para la célula de montaje flexible DISA FMS-200 (figura 5) del caso de estudio. Como ya se ha comentado, esta célula realiza las operaciones de montaje y almacenamiento de un dispositivo de giro que consta de cuatro piezas: una base, un cojinete, un eje y una tapa.

El objetivo de este apartado es revelar las particularidades de este tipo de componente, respecto al componente que controla una unidad de trabajo, a través de los cinco pasos de desarrollo que se describen a continuación.

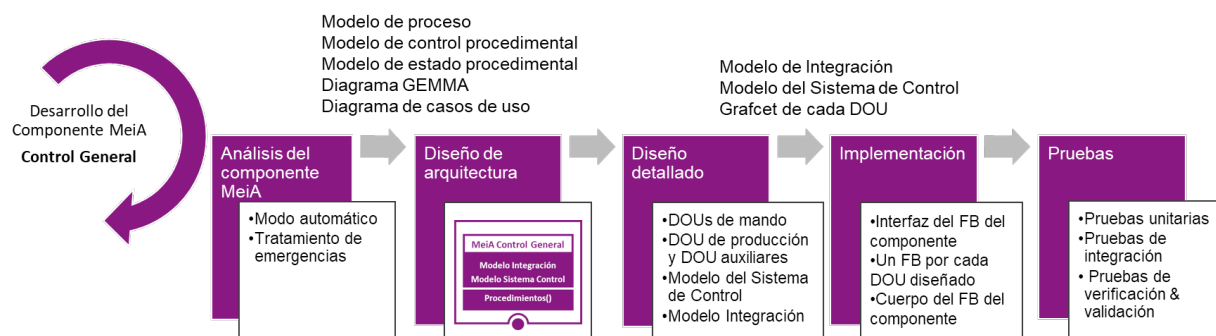


Figura 75

Pasos de desarrollo del componente MeiA para el control de célula

5.1. Análisis del componente MeiA

El análisis parte de los requisitos que proporcionan información sobre: (1) las operaciones de producción que el componente del control general debe solicitar a los componentes que controlan las unidades de trabajo para realizar el ensamblaje; (2) los modos de funcionamiento del sistema de control de célula; (3) las condiciones de inicio, así como la adquisición del plan de producción; (4) la información para el sistema de supervisión relativa a los componentes de las unidades y la trazabilidad de las operaciones y los productos; y (5) las señales intercambiadas, por un lado, con los componentes de las unidades para solicitar sus servicios y recibir su respuesta una vez que se ha prestado un servicio y, por otro lado, con otros sistemas que interactúan con el control general.

El componente MeiA del control general es responsable de gestionar los diferentes modos de funcionamiento. Para ello, requiere cancelar las DOU de decisión de las unidades de trabajo para que el control general gestione los modos de funcionamiento a través de sus DOU auxiliares. En este caso, el control general solo gestiona los modos de funcionamiento automático y emergencia, que determinan las fases de la metodología MeiA que guiarán el análisis utilizando la terminología del dominio. Así, el análisis se realizará de acuerdo con los pasos de la Fase I (secuencia principal del modo automático), la Fase V (emergencia) y la Fase VI (producción normal), tal y como se indica en la figura 76.

●	Fase I: Secuencia Principal – Modo Automático	✓
●	Fase II: Modo Manual	
●	Fase III: Modo de Pruebas	
●	Fase IV: Fallos	
●	Fase V: Paro de Emergencia	✓
●	Fase VI: Producción Normal	✓

Figura 76

Fases de análisis para el componente MeiA

Organización del arranque y parada del modo automático (Fase I)

Esta fase establece la secuencia principal, que organiza el arranque en modo automático y la parada programada de la célula, generando las señales de mando que informan a producción normal sobre el estado del sistema en cada momento. El análisis de la Fase I se realiza siguiendo los pasos que se recogen en la figura 77, los cuales están más detallados en el Anexo.

La solicitud del modo automático se puede realizar desde el sistema de supervisión del componente MeiA del control general o desde el botón de inicio de cualquier unidad de la célula, siempre y cuando todas las unidades tengan el selector automático/manual en posición automático (Paso 1).

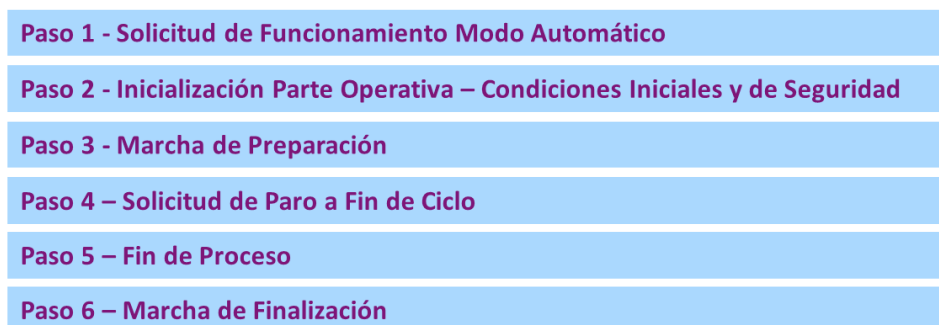


Figura 77

Pasos de análisis para la Fase I-Modo automático

Para comenzar este modo de funcionamiento, el componente debe obtener el plan de producción e inicializar la parte operativa solicitando a todas las unidades que se detengan en su estado inicial (Paso 2), tras lo cual solicitará la ejecución de las marchas de preparación a aquellas unidades que las precisen (Paso 3).

Durante la producción normal, la solicitud de paro del proceso (paro a fin de ciclo) se puede realizar desde el sistema de supervisión del control general o desde el pulsador de parada de cualquier unidad de la célula (Paso 4). Esta solicitud implica que se finalizarán los ensambles actuales y no se introducirán nuevos palés en el sistema de producción.

El ciclo de producción termina cuando finaliza el plan de producción (Paso 5). Al terminar la producción, el componente del control general realizará la marcha de finalización realizando las solicitudes a aquellas unidades que las necesiten (Paso 6).

Establecimiento de las operaciones de producción (Fase VI)

El análisis de la Fase VI se realiza siguiendo los pasos que se recogen en la figura 78, los cuales están más detallados en el Anexo.

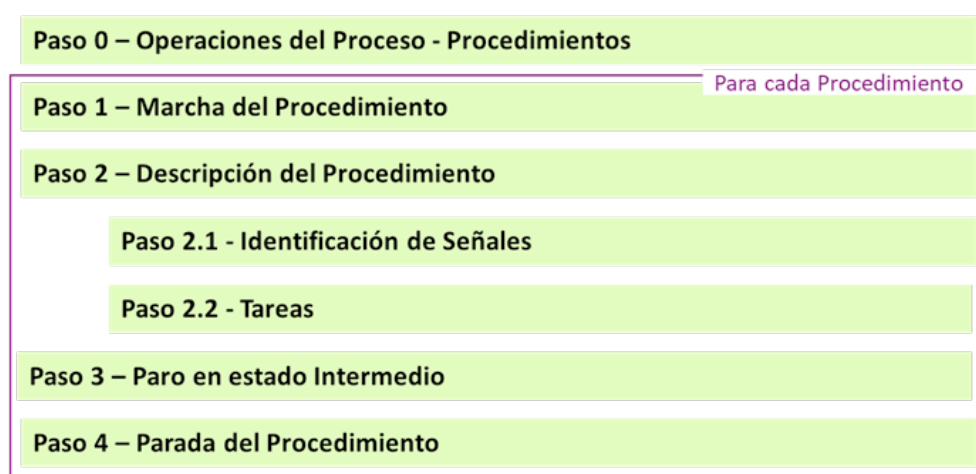


Figura 78

Pasos de análisis para la Fase VI-Producción normal

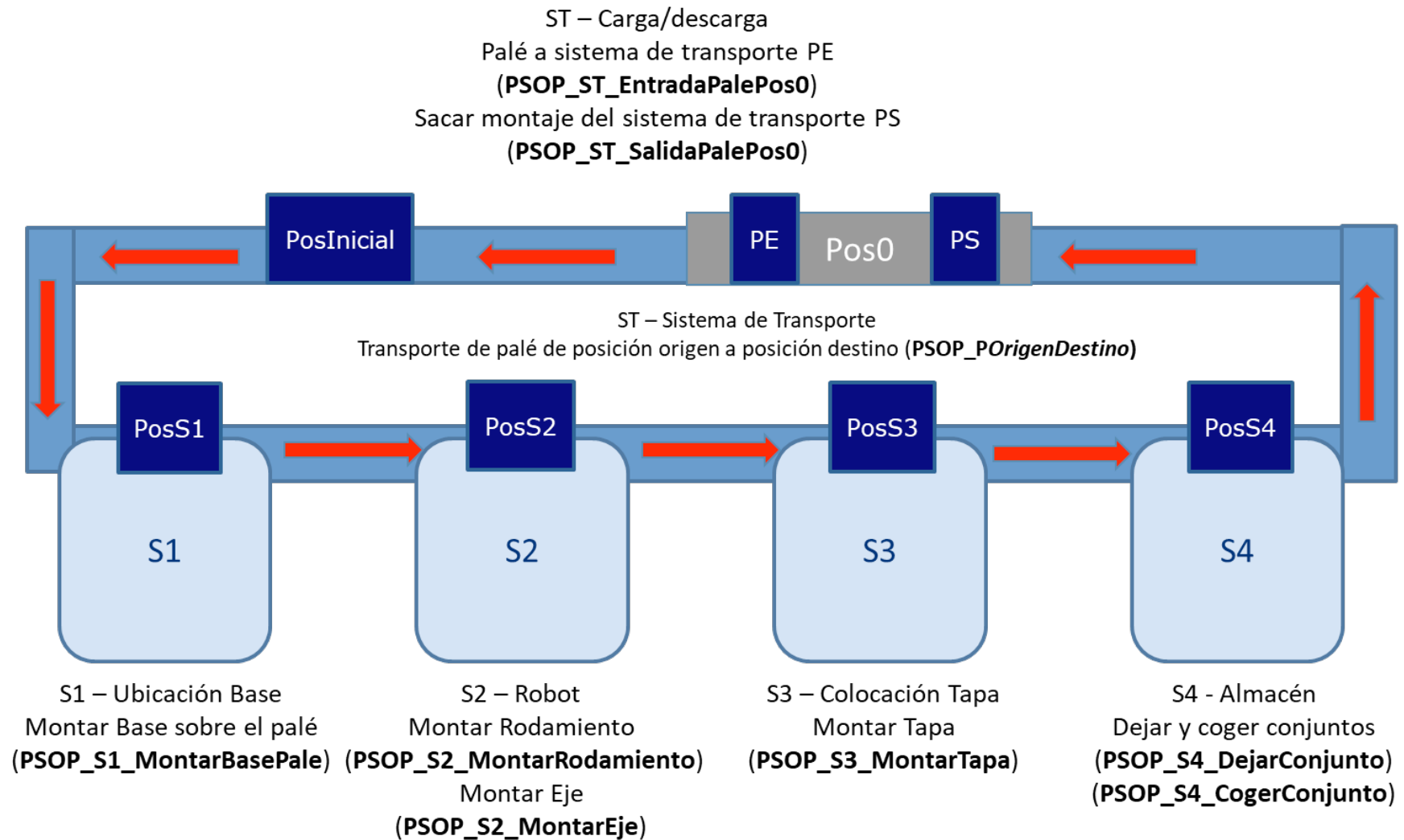


Figura 79

Esquema de posiciones del transporte de palés

El componente MeiA del control general es responsable de ejecutar las operaciones de producción para completar el plan de producción, lo cual se lleva a cabo realizando las solicitudes de ejecución de las operaciones a las distintas unidades a través de sus DOUs de producción. Las operaciones son las siguientes: montar base, montar rodamiento y eje, montar tapa, dejar conjunto y coger conjunto del almacén, y las operaciones de transportar palé entre las unidades, e introducir y sacar palé del sistema. En la figura 79 se muestran las posiciones por las que se desplaza el palé para recorrer todas las unidades de la célula. En cada posición se gestionarán las operaciones a realizar en el montaje en curso.

Organización del arranque y parada de la emergencia (Fase V)

El análisis de la Fase V se realiza siguiendo los pasos que se recogen en la figura 80, los cuales están más detallados en el Anexo.



Figura 80

Pasos de análisis para la Fase V-Paro de emergencia

La solicitud del modo emergencia de la célula se puede realizar desde el sistema de supervisión del componente del control general, lo que implica solicitar el modo emergencia de todas las unidades. Su desactivación se realizará cuando se quite la señal de emergencia del sistema de supervisión.

También se puede solicitar el modo emergencia de una unidad desde el sistema de supervisión del control general o desde el pulsador de parada de emergencia de la unidad, lo que implica una parada inmediata y segura de dicha unidad.

La desactivación de este modo se puede realizar mediante una solicitud desde el control general, o desenclavando la seta de emergencia y dando al pulsador de rearme desde la unidad que ha solicitado la emergencia.

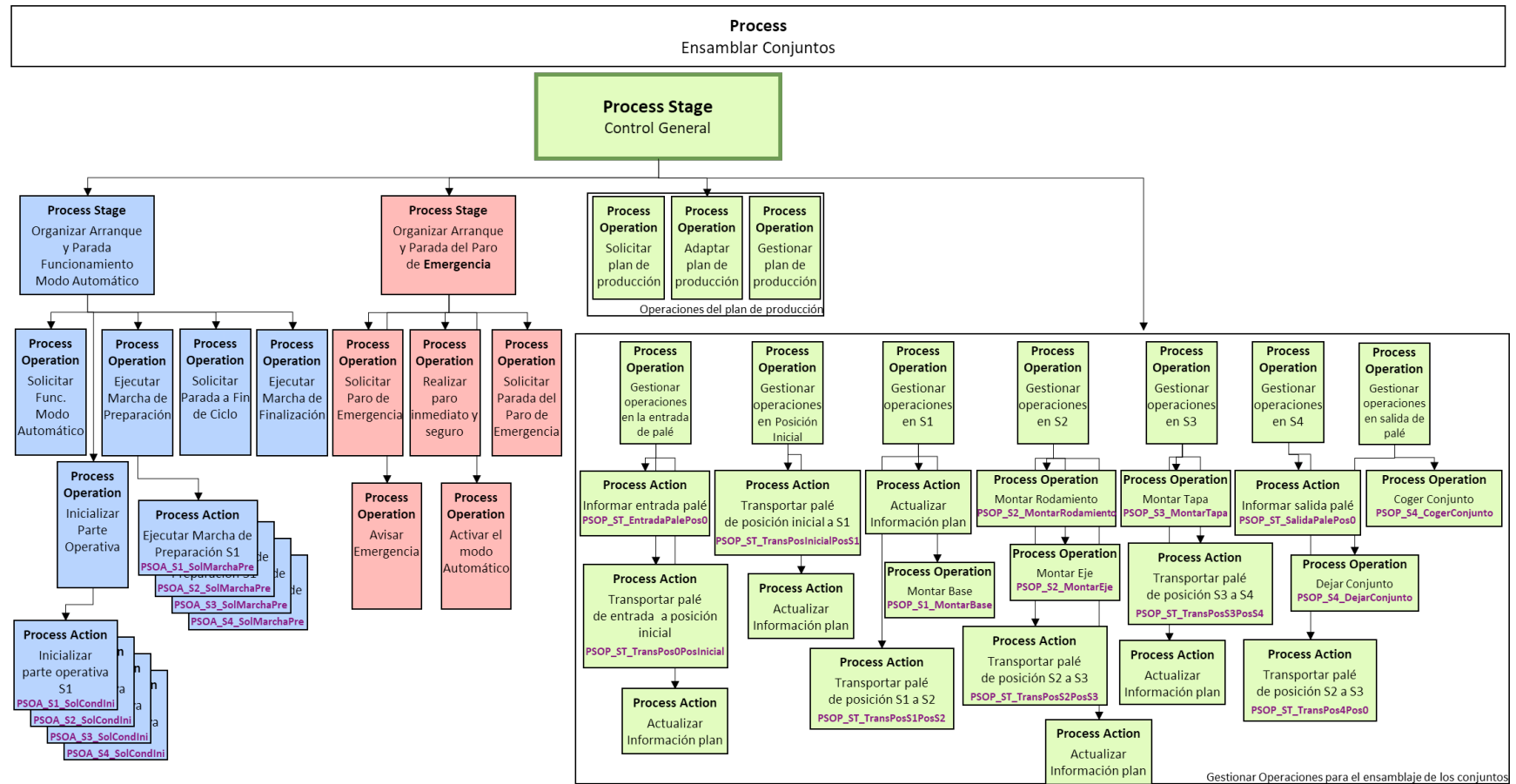


Figura 81
Modelo de proceso

Una vez finalizado el análisis, los modelos necesarios para construir y documentar el componente MeiA del control general se obtienen unificando los modelos obtenidos en cada una de las fases.

Las figuras 81-85 presentan el modelo de proceso, el modelo de control procedimental, el diagrama GEMMA, el modelo de estado procedimental y el diagrama de casos de uso de este componente.

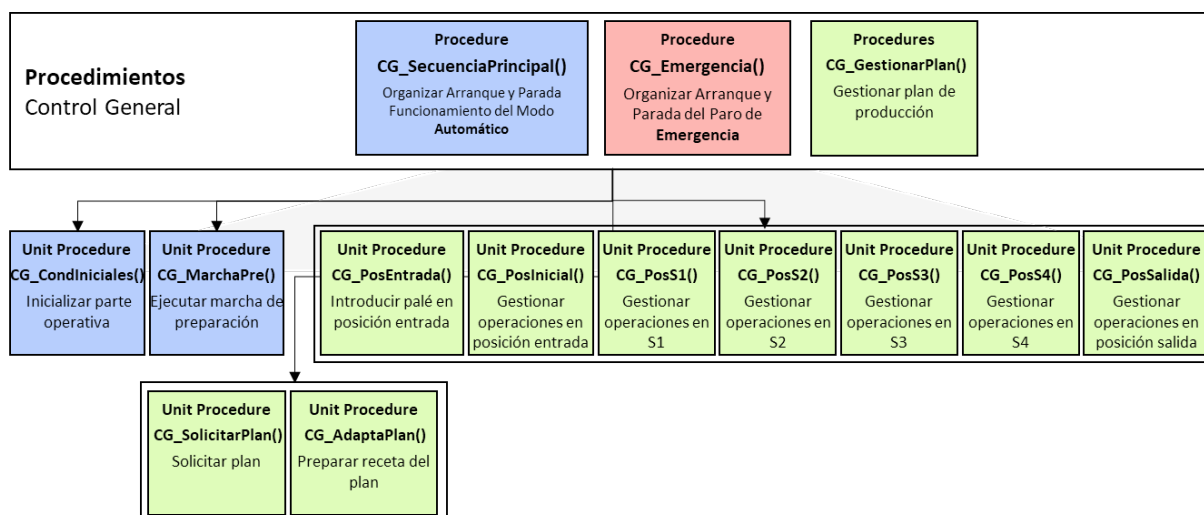


Figura 82

Modelo de control procedimental

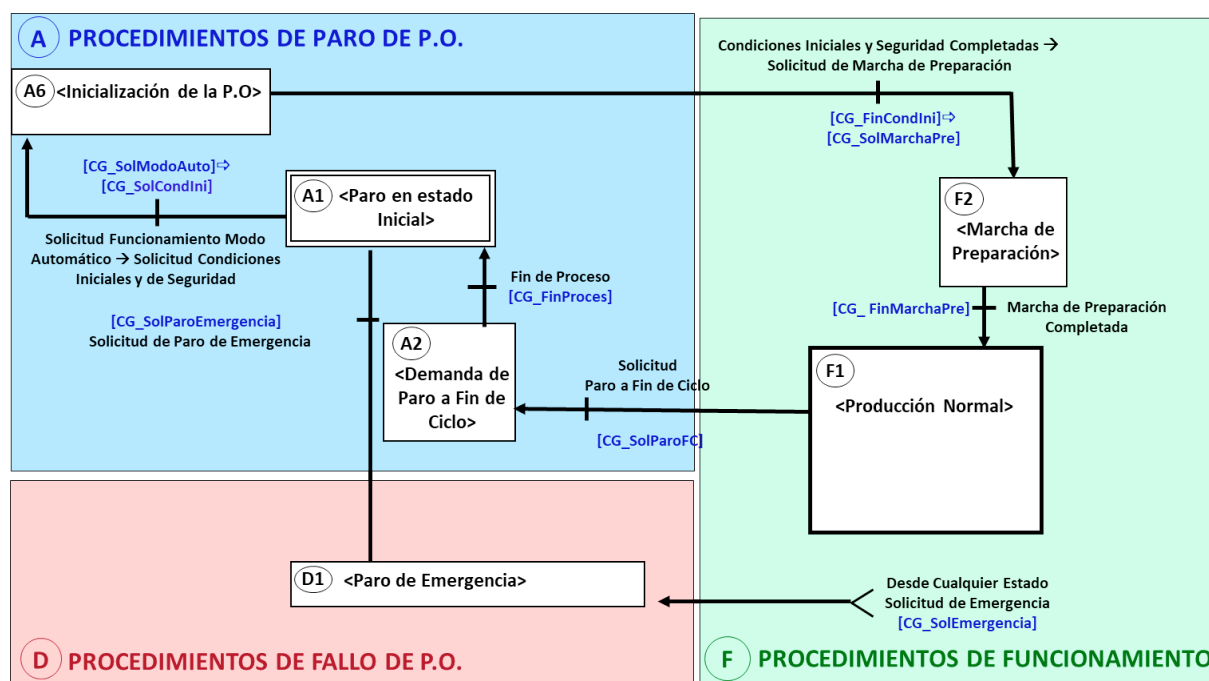


Figura 83

Diagrama GEMMA

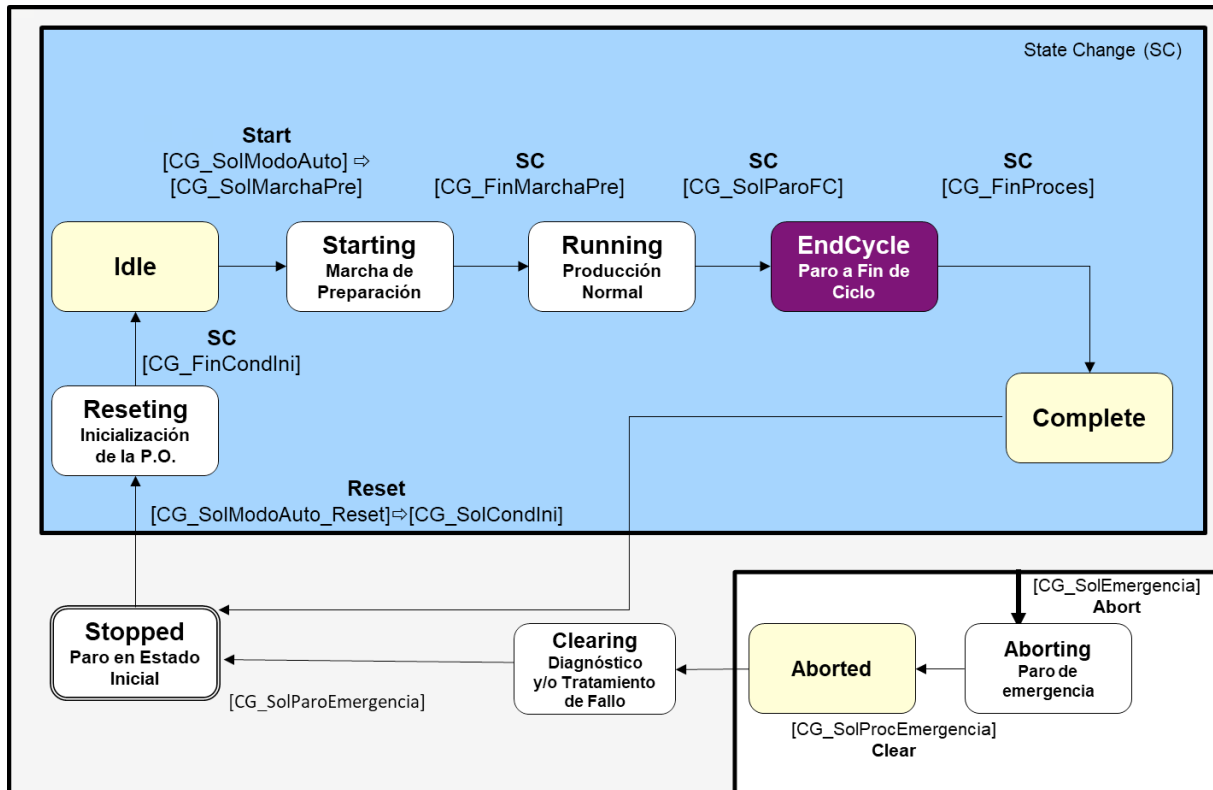


Figura 84

Modelo de estado procedimental

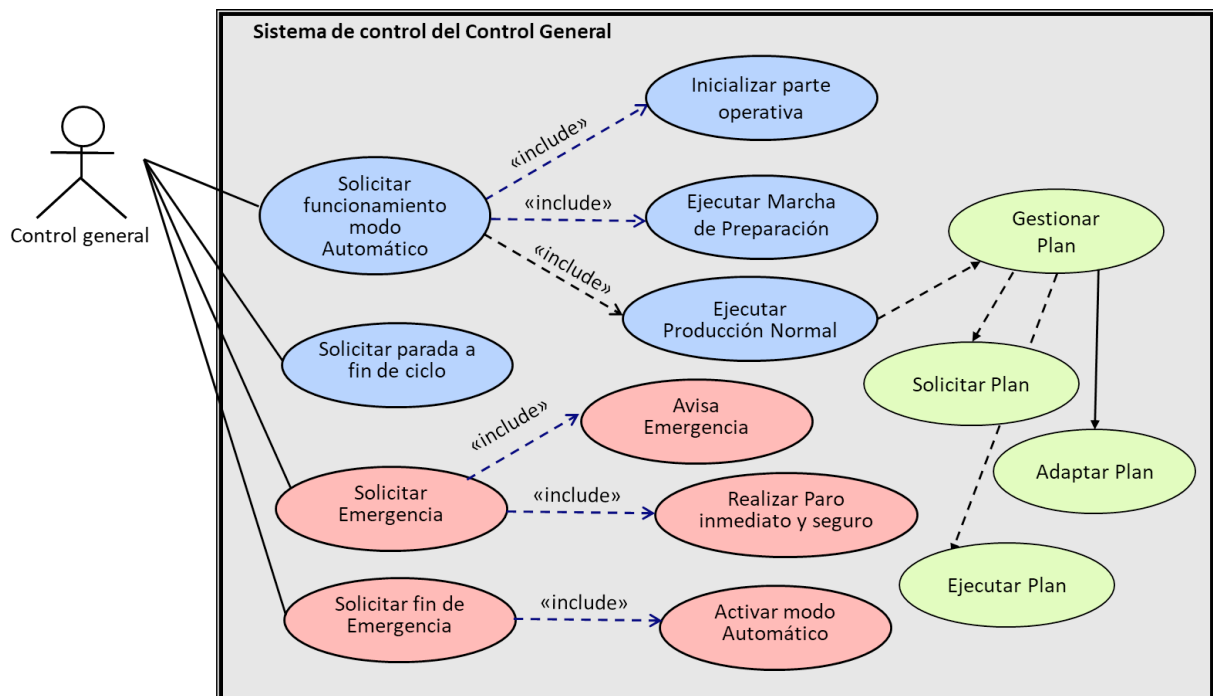


Figura 85

Diagrama de casos de uso

La arquitectura de todo componente MeiA comprende el modelo de integración, el modelo del sistema de control y un conjunto de procedimientos (definidos en el modelo de control procedimental) que modifican u obtienen información de ambos modelos con acceso restringido según el dispositivo o componente con el que interactúe.

Diagrama de flujo de la arquitectura de control de un sistema de transporte aéreo. El diagrama muestra la jerarquía de control desde el nivel de integración general hasta los procedimientos específicos de cada estación. En la parte superior, el 'Módulo de Integración' y el 'Módulo del Sistema de Control' se conectan con el 'MeiA Control General'. Este a su vez se conecta con los 'Modelos de Integración' y 'Modelos de Sistema Control' de cada estación: S1 (Ubicación Base), S2 (Robo) y ST (Transporte). Cada estación tiene su propio 'Procedimientos()' y 'Modelo Sistema Control'. El diagrama también incluye un 'Planificador' y un 'Supervisor - HMI' que interactúan con el sistema. En la parte inferior, se detallan los procedimientos de control general, como 'Procedimiento CG_SecuenciaPrincipal', 'Procedimiento CG_Emergencia' y 'Procedimiento CG_GestionaPlan', que se ejecutan en las estaciones S1, S2 y ST.

5.3. Diseño detallado del componente MeiA

78

Diseño detallado de las DOU

Dado que estos procedimientos llevan a cabo las operaciones identificadas en el modelo de procesos, las DOU realizan un conjunto de solicitudes de servicio a componentes que controlan unidades (figura 87). Por ejemplo, la figura 88 presenta el graficet de diseño detallado de un procedimiento auxiliar denominado «Marcha de preparación» de la Fase I. Este procedimiento solicita un plan de producción al planificador y lo convierte en una tabla con las recetas para fabricar los productos del plan de producción (rama izquierda del graficet). También solicita servicios de «Marcha de preparación» (las otras ramas del graficet) a aquellos componentes que lo requieren (S1-Ubicación base, S2-Robot, S3-Colocación tapa y S4-Almacén). Una vez que una unidad completa el servicio solicitado, su modelo del sistema de control se actualizará para permitir que el control general compruebe la finalización del servicio.

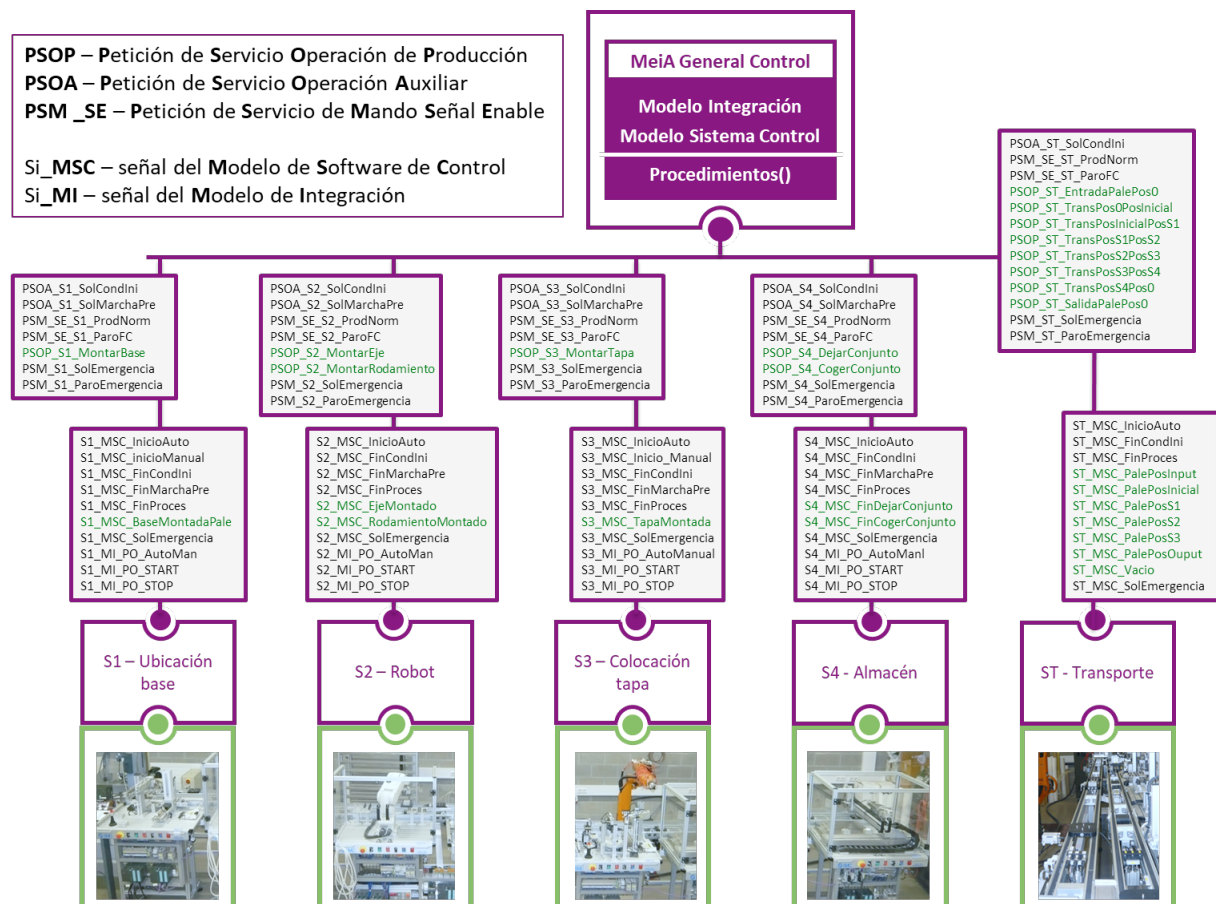


Figura 87

**Servicios solicitados a los componentes MeIA de las unidades
y señales que confirman la finalización del servicio**

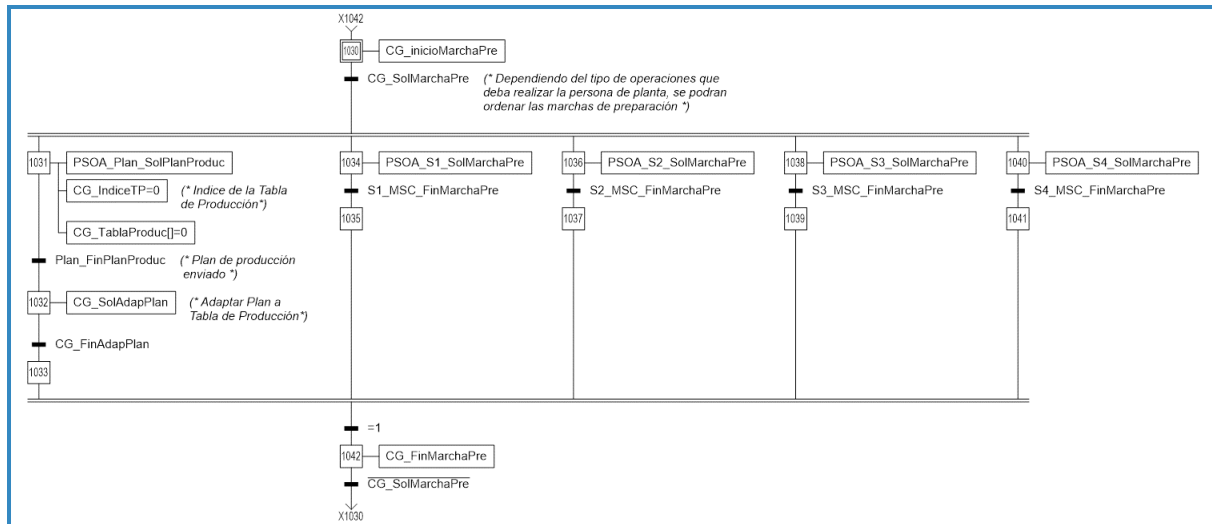


Figura 88

DOU auxiliar «Marcha de preparación» (Fase I)

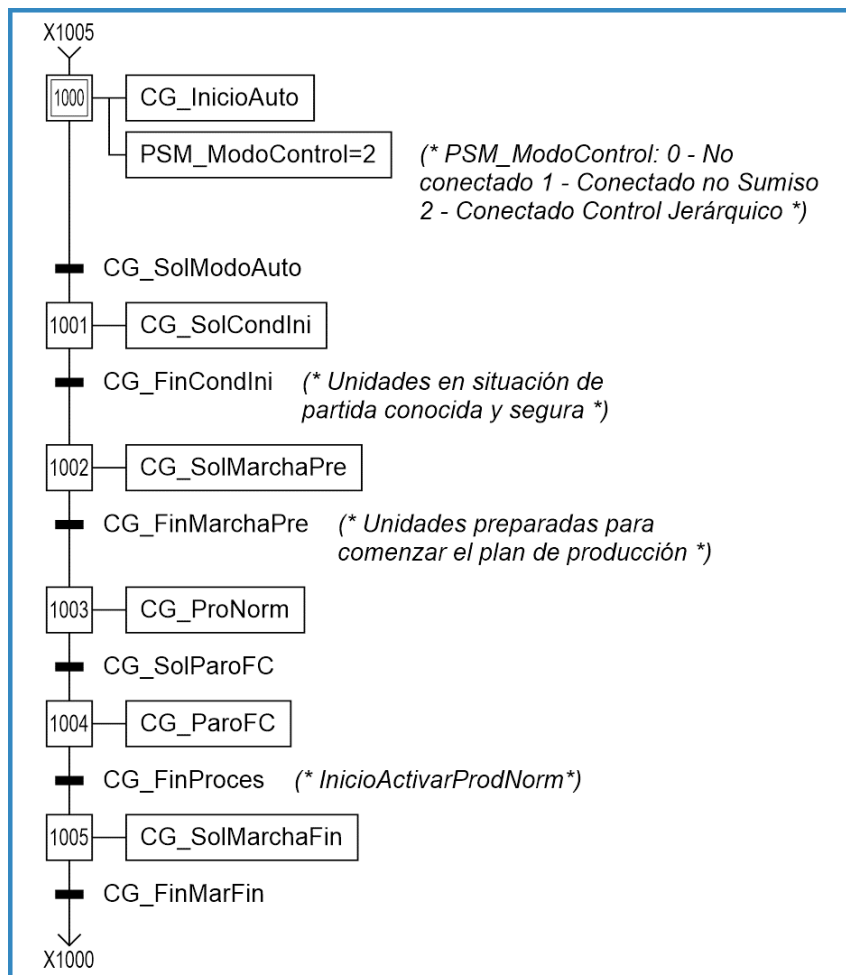


Figura 89

DOU de decisión «Secuencia principal» (Fase I)

La figura 89 presenta la plantilla personalizada de la DOU «Secuencia principal», que define el inicio y la parada del modo de funcionamiento automático del control de la célula. Las figuras 88 y 90 corresponden a las DOU auxiliares de dicho modo de funcionamiento. Las figuras 91-95 corresponden a las DOU de producción. La figura 96 presentan la DOU del modo emergencia.

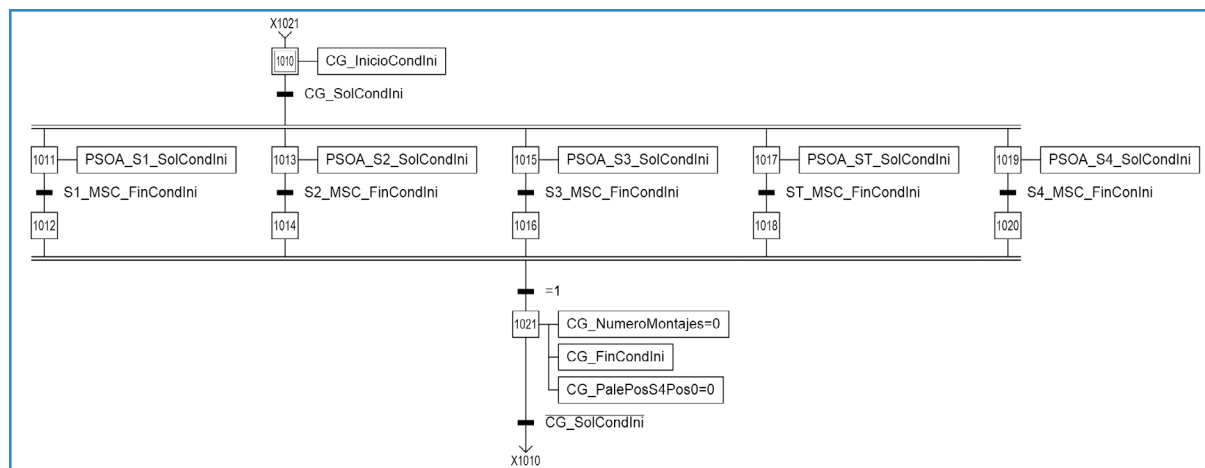


Figura 90
DOU auxiliar «Condiciones iniciales» (Fase I)

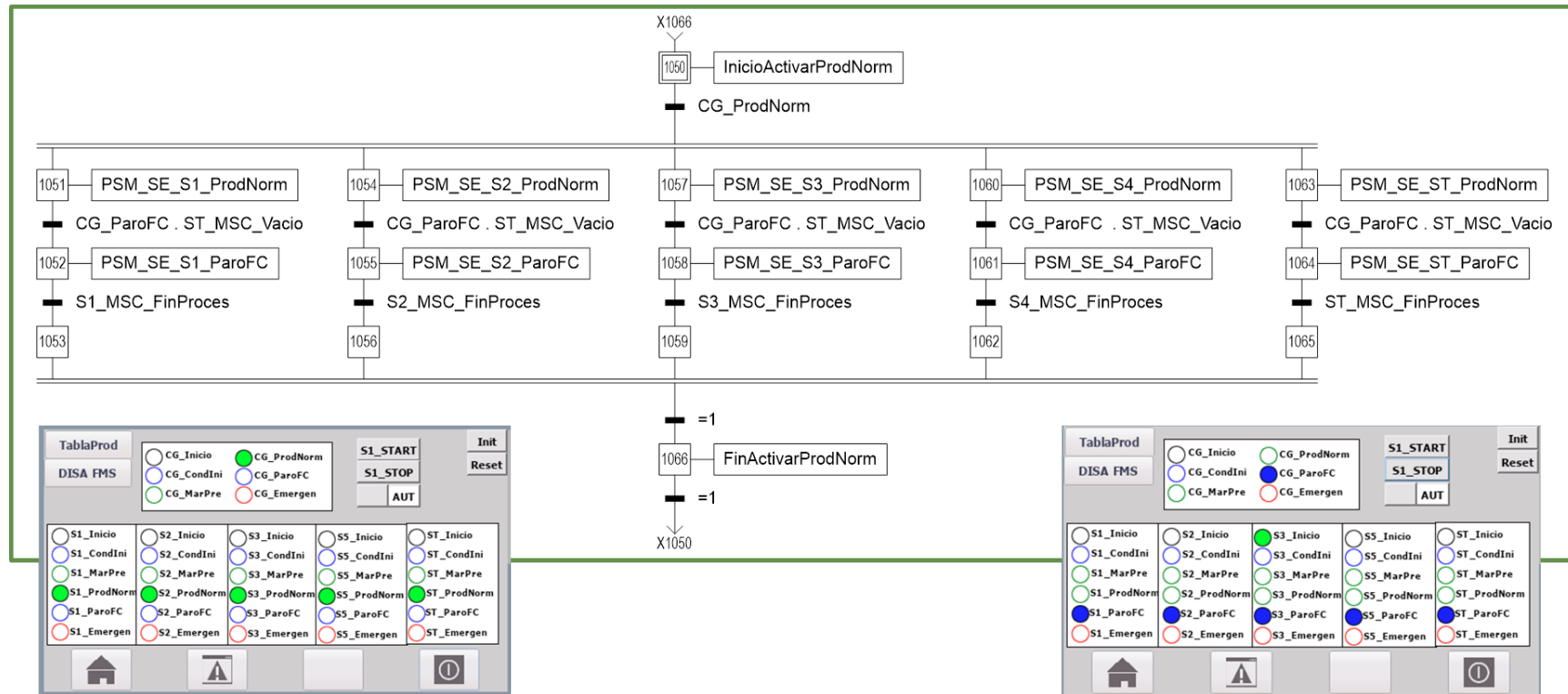


Figura 91

DOU de producción «Activar producción normal» (Fase VI)

DOU de producción «Adaptar plan de producción» (Fase VI)

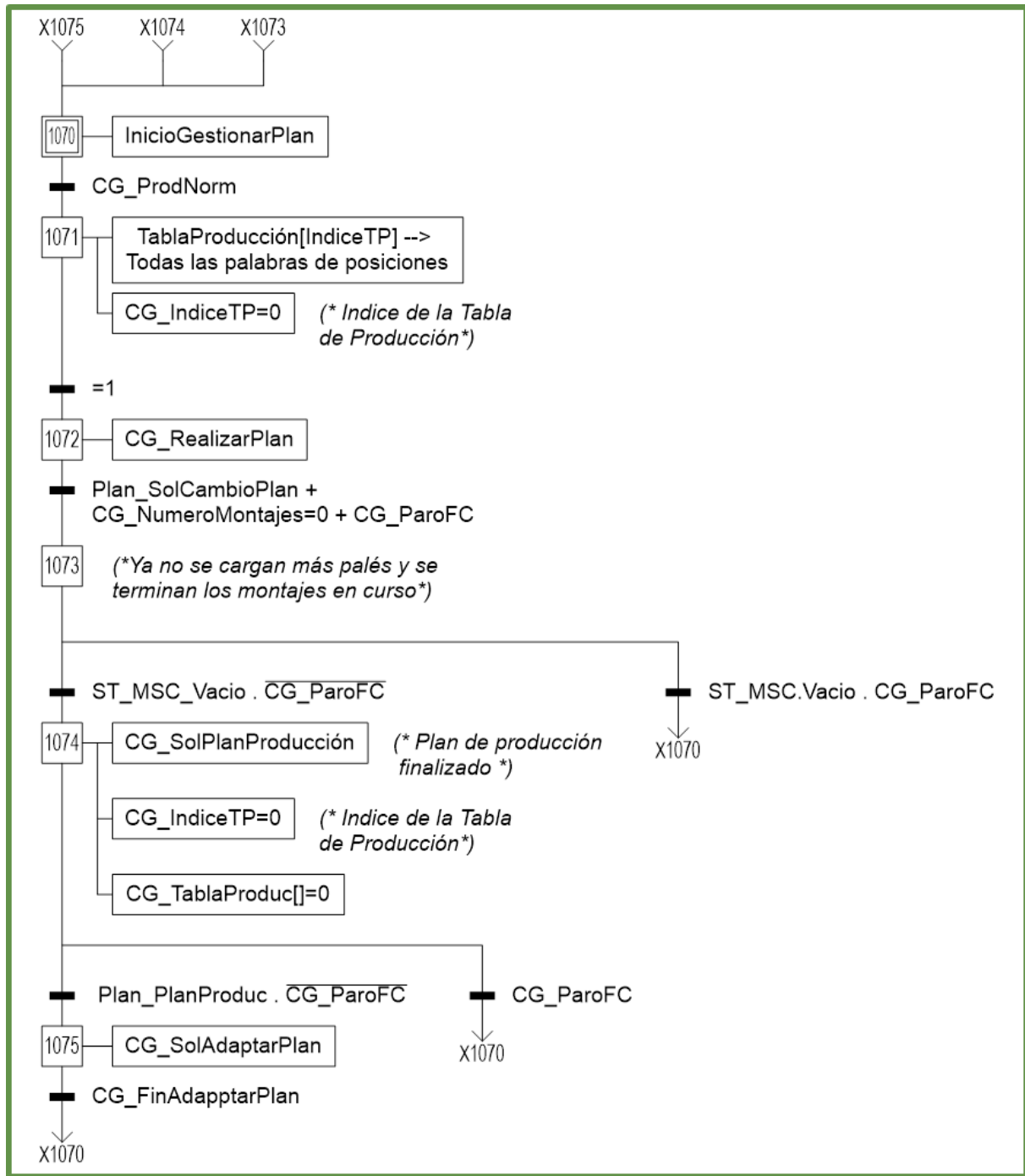


Figura 93

DOU de producción «Gestionar plan de producción» (Fase VI)

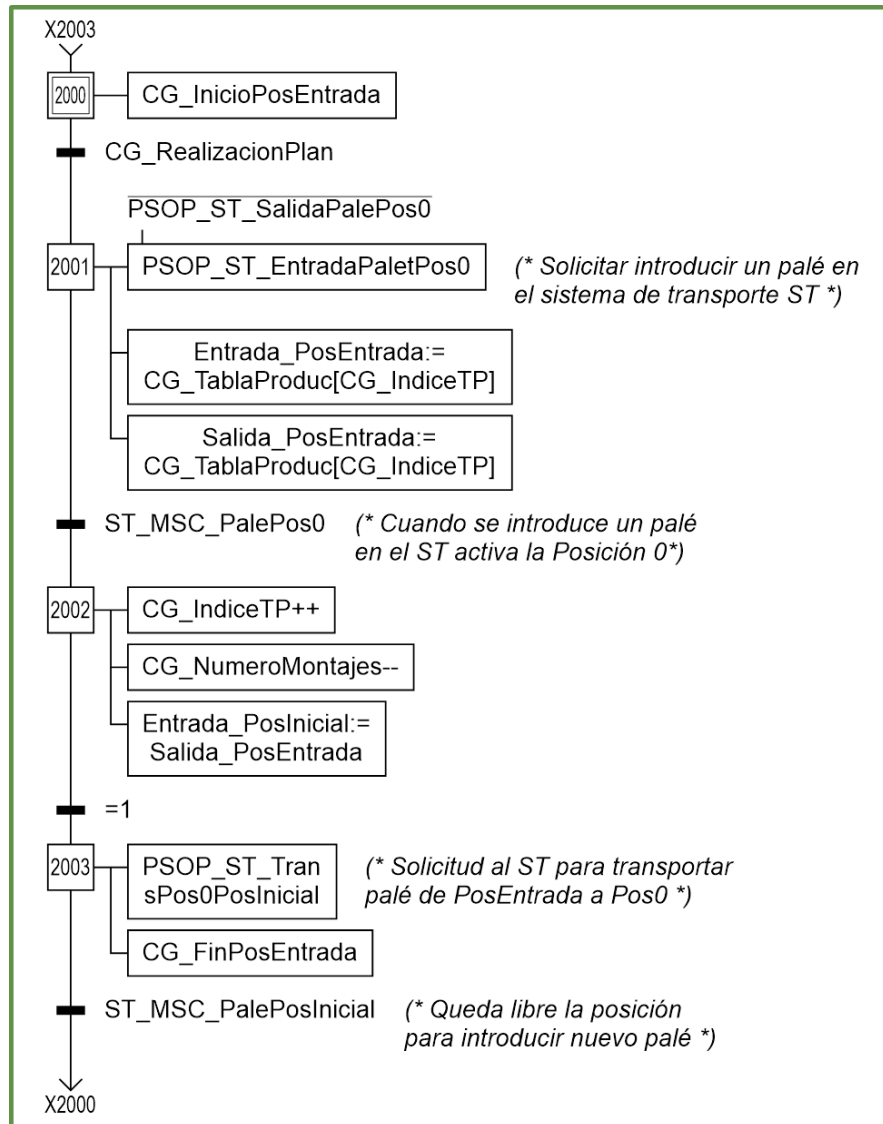


Figura 94

DOU de producción «Gestionar operaciones en posición de entrada» (Fase VI)

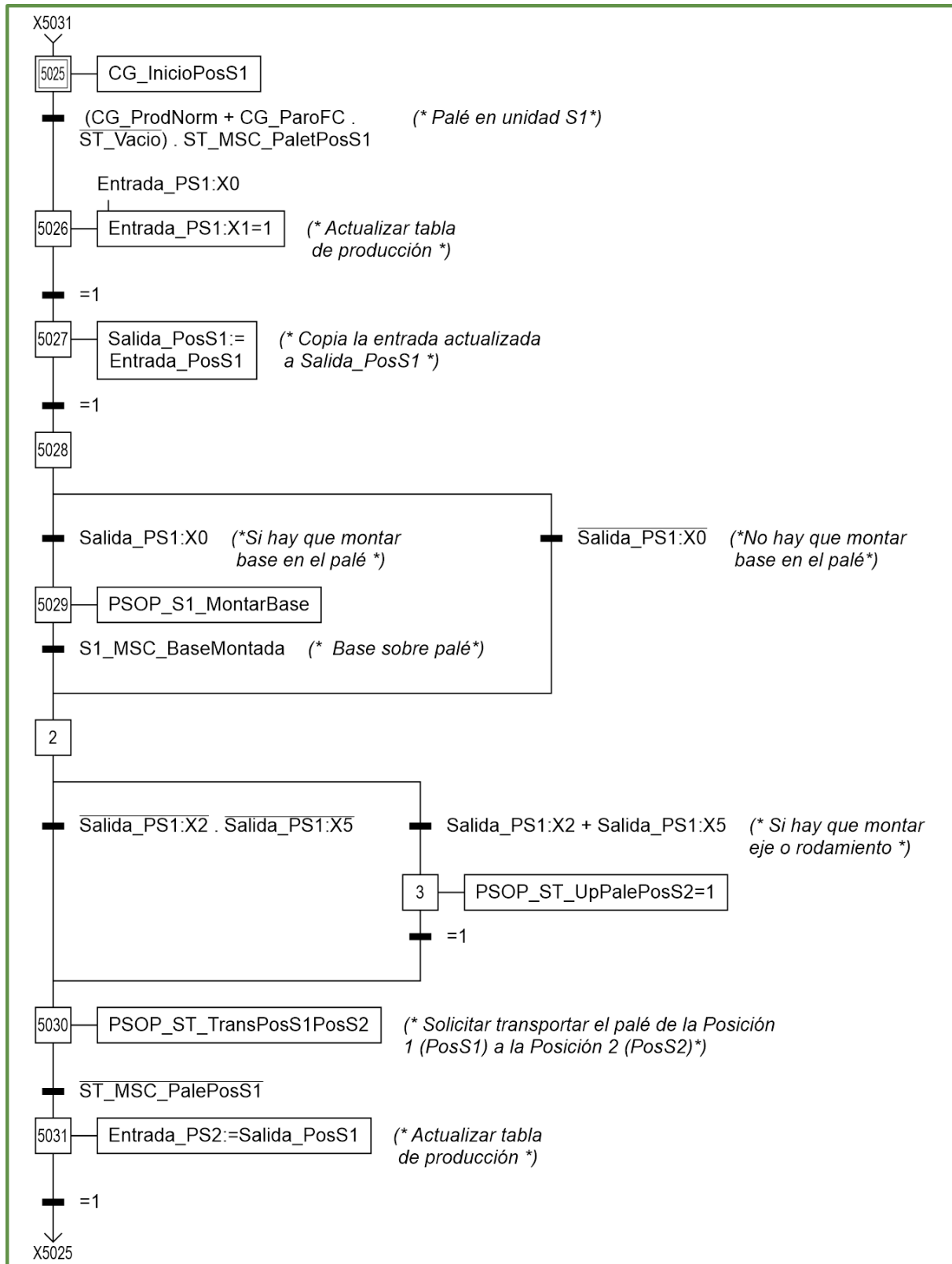


Figura 95

DOU de producción «Gestionar operaciones en posición S1» (Fase VI)

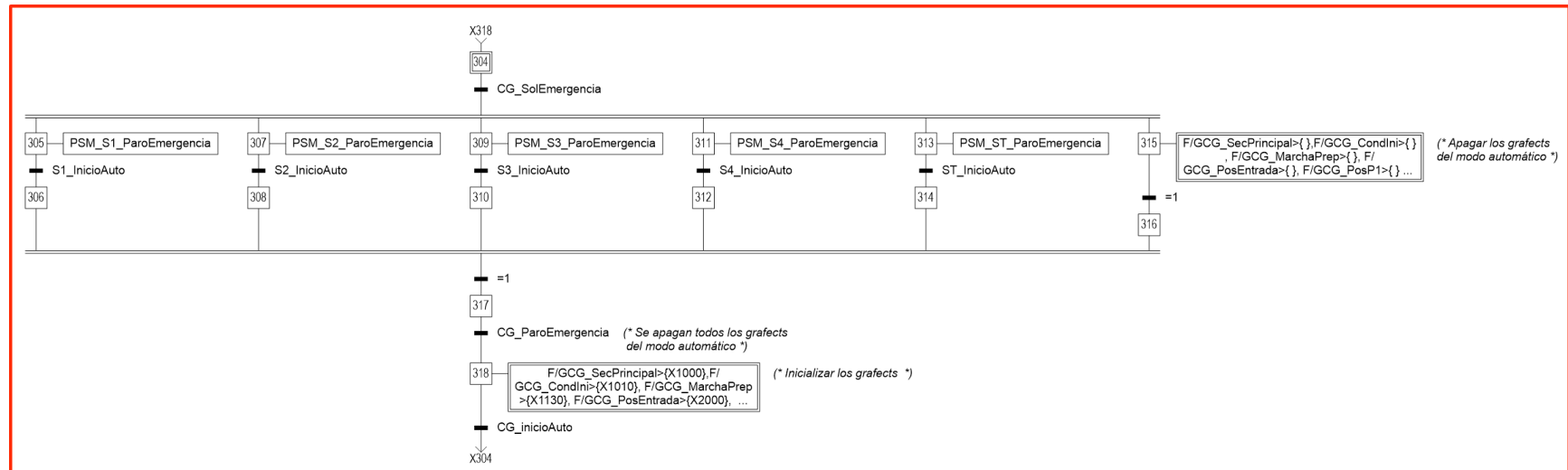


Figura 96
DOU de decisión «Emergencia» (Fase V)

Diseño detallado del modelo del sistema de control

El modelo del sistema de control proporciona toda la información relativa al software de control, ya que agrupa las operaciones del modelo de proceso por modos de funcionamiento (automático y emergencia) e incluye los procedimientos que realizan estas operaciones del modelo de control procedimental y las señales de control asociadas. En el caso del control general, también se incluye las operaciones para gestionar el plan de producción, tal y como se puede apreciar en la figura 97.

Diseño detallado del modelo de integración

El modelo de integración organiza la información de los diferentes equipos o procesos que interactúan con el componente. Dicho modelo contiene las referencias para acceder a los componentes de control de las unidades de trabajo de la célula y otros procesos que solicitan servicios (planificador y HMI), careciendo de modelo físico (figura 98).

Diseño detallado de los gemelos funcionales de los componentes MeiA de unidades de trabajo

Dado que los servicios que el control general puede solicitar a los componentes MeiA que controlan las unidades están identificados, el diseño del gemelo funcional de un componente que controla una unidad consiste en identificar los procedimientos de decisión, producción y auxiliares que dicho componente ejecutará para llevar a cabo sus servicios. Una vez identificados, se buscarán los componentes funcionales básicos asociados en la biblioteca de componentes de operaciones. En la figura 99 se presentan los componentes funcionales básicos para desarrollar el gemelo funcional del componente MeiA que controla la unidad de trabajo S1-Ubicación base.

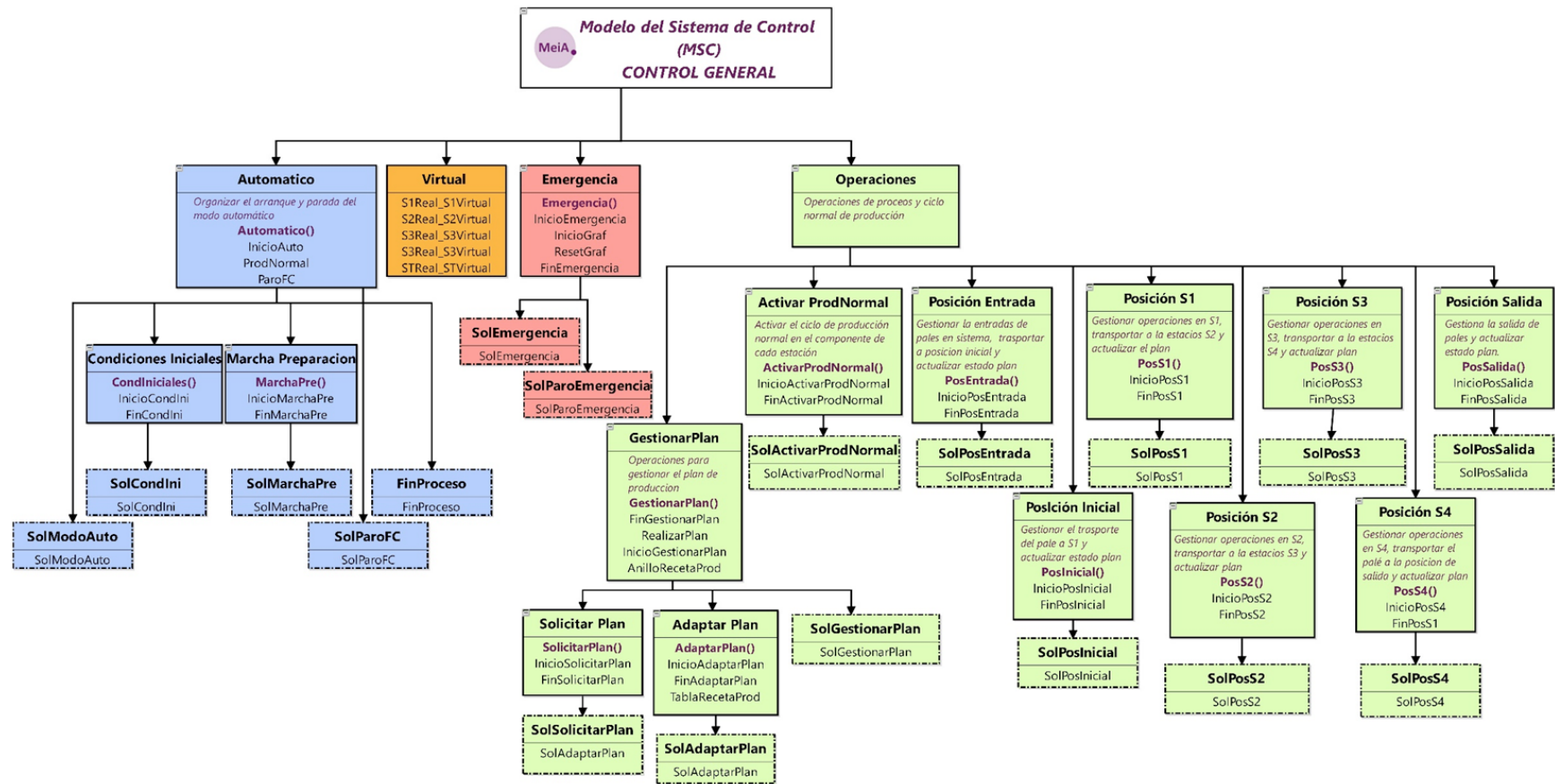


Figura 97

Modelo del sistema de control del componente MeIA

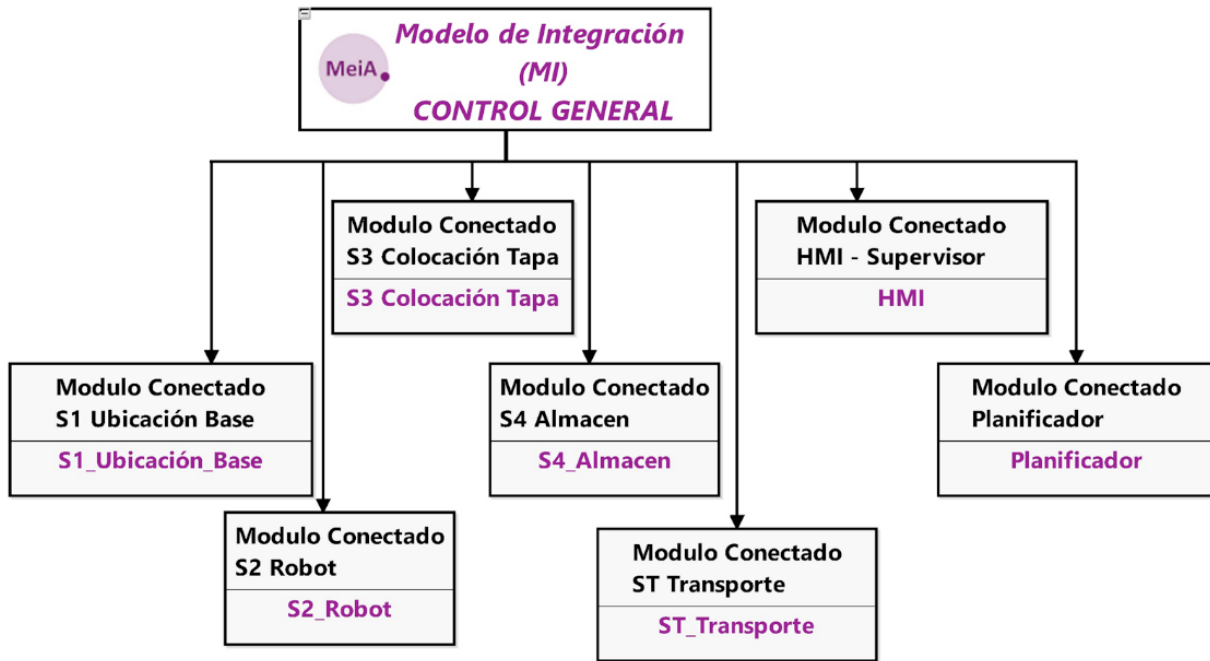


Figura 98

Modelo de integración del componente MeiA



Figura 99

Los CFB de las operaciones del componente MeiA de la unidad S1-Ubicación base

5.4. Implementación del componente MeiA

La figura 100 presenta la POU de tipo FB correspondiente al componente MeiA del control general implementado en TIA Portal [15]. Su implementación precisa definir la interfaz del FB, implementar las POU de las DOUs de diseño y definir el cuerpo del FB. No requiere la creación de la tabla de variables globales pues no se conecta directamente al sistema físico, lo hace a través de los componentes de las unidades. A continuación, se describe la implementación en detalle.

Definición de la interfaz del FB del componente MeiA

La definición de la interfaz requiere la declaración de las variables estáticas de tipo estructura de los modelos de integración (figura 101) y del sistema de control (figura 102), y otras variables temporales y constantes necesarias en la ejecución de los procedimientos del componente. A diferencia de los componentes MeiA de unidades de trabajo, no hay entradas/salidas en la interfaz del FB porque no hay conexión física con las unidades de la célula.

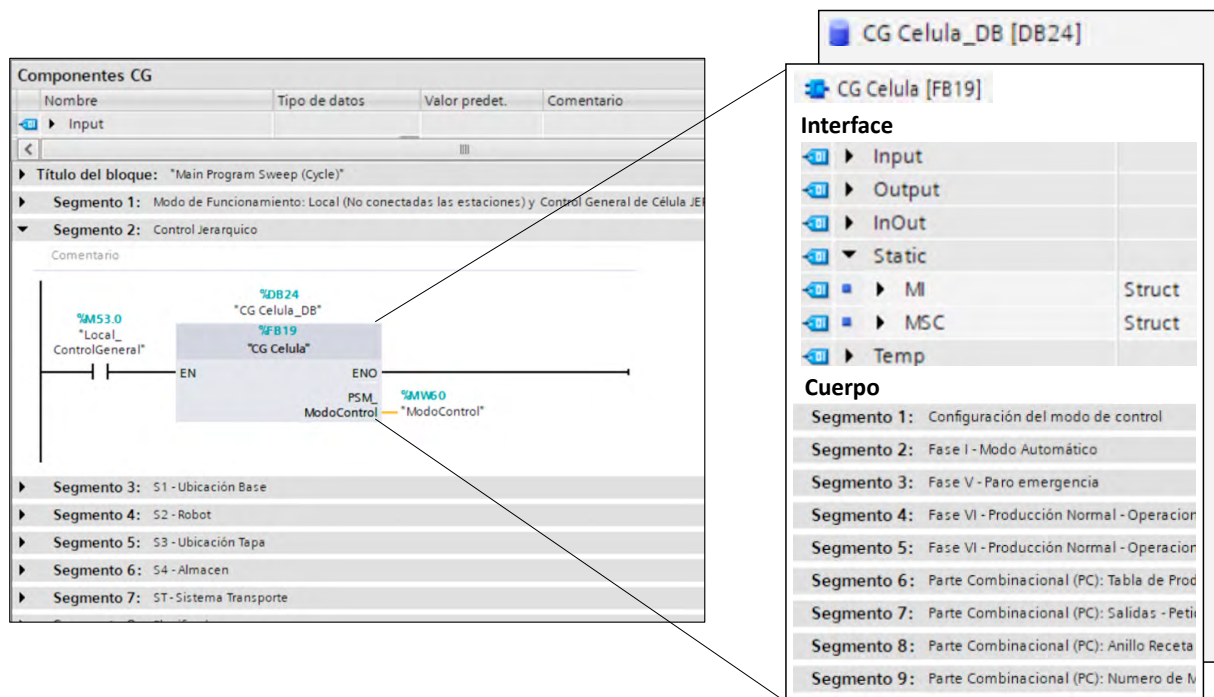


Figura 100

Implementación del componente MeiA del control general

MI	Struct
S1 Ubicación Base	Struct
S1 Ubicación Base	String
S2 Robot	Struct
S2 Robot	String
S3 Ubicación Tapa	Struct
S3 Ubicación Tapa	String
S4 Almacén	Struct
S4 Almacén	String
ST Transporte	Struct
ST_Sistema Transporte	String
Planificador	Struct
HMI	Struct

Figura 101

Variable estática del modelo de integración

▼ MSC	Struct
▶ Automatico	Struct
▶ Emergencia	Struct
▼ Operaciones	Struct
▶ SolicitarPlan	Struct
▶ AdaptarPlan	Struct
▶ GestionarPlan	Struct
▶ ActivarProdNorm	Struct
▶ PosEntrada	Struct
▶ PosInicial	Struct
▶ PosS1	Struct
▶ PosS2	Struct
▶ PosS3	Struct
▶ PosS4	Struct
▶ PosSalida	Struct

Figura 102

Variable estática del modelo del sistema de control

Implementación de un FB por cada DOU diseñado

Cada DOU se implementa mediante una POU de tipo FB (figura 103) utilizando cualquier lenguaje de programación de la norma IEC 61131-3.

▼ Control General
CG Celula [FB19]
▼ CG Automatico
GCG_CondIniciales [FB6]
GCG_MarchaPre [FB8]
GCG_SecuenciaPrincipal [FB42]
▶ CG DBs
▶ CG Emergencias
▼ CG Producción Normal
GCG_ActivarProdNorm [FB11]
GCG_AdaptarPlan [FB9]
GCG_GestionarPlan [FB10]
GCG_GestionPlan_1 [FB18]
GCG_PosEntrada [FB13]
GCG_PosInicial [FB12]
GCG_PosS1 [FB14]
GCG_PosS2 [FB15]
GCG_PosS3 [FB16]
GCG_PosS4 [FB41]
GCG_PosSalida [FB17]

Figura 103

Las POU de las DOU diseñadas

Las POU implementan las solicitudes de servicio a componentes MeIA que controlan unidades de trabajo. Por ejemplo, en la figura 104 se presenta las solicitudes de servicio que el componente del control general puede enviar al componente de la unidad S1-Ubicación base, las respuestas que este último envía al primero en respuesta a sus solicitudes y cómo se implementan estas solicitudes y respuestas en este caso práctico. Así, el componente del control general realiza la solicitud de un servicio escribiendo en el modelo de integración del componente de la unidad, mientras que la información sobre el estado de la ejecución del servicio se obtiene leyendo su modelo del sistema de control. El componente del control general también necesita información del panel de operación de la unidad, la cual obtiene leyendo su modelo de integración.

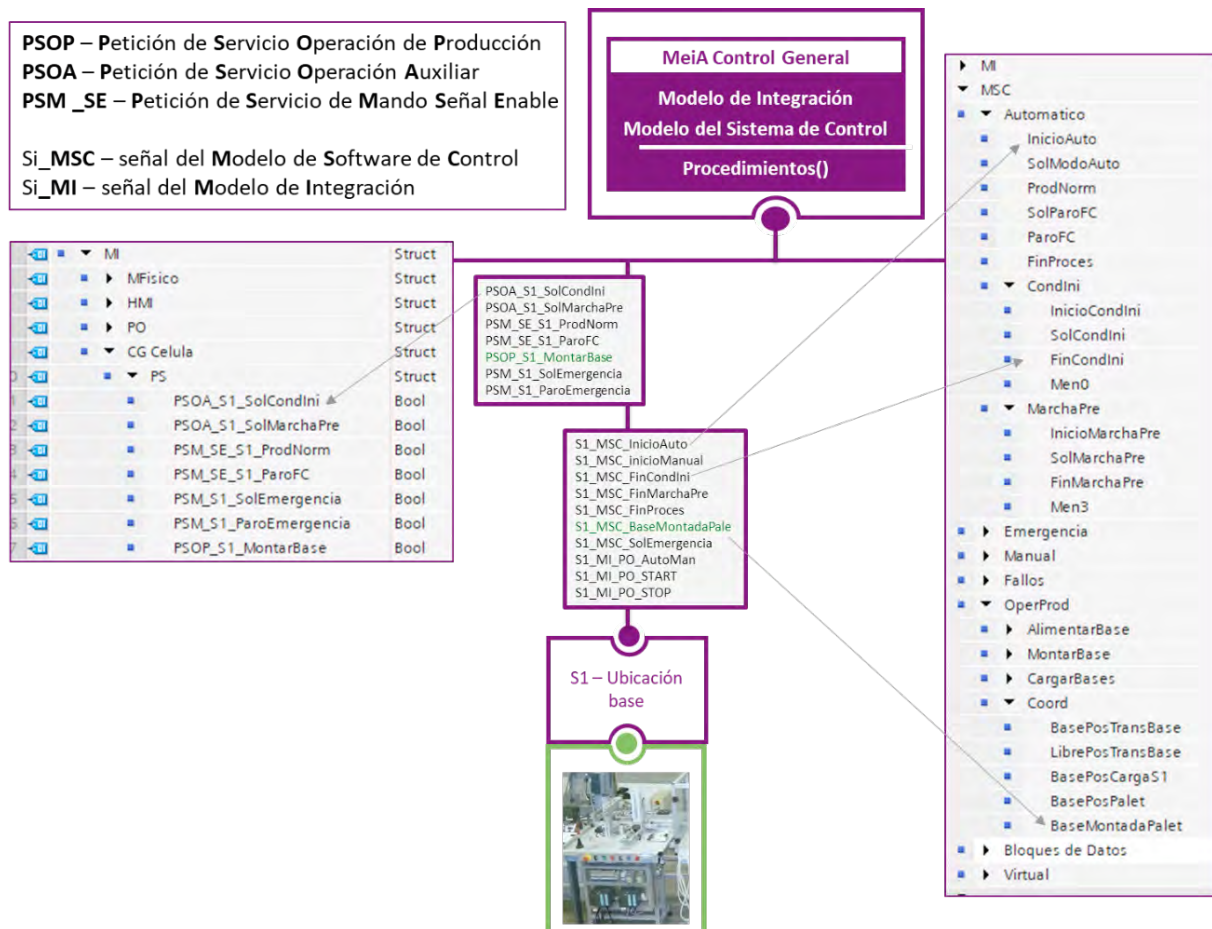


Figura 104

Solicitudes de servicio del componente MeIA del control general al componente MeIA de la unidad S1-Ubicación base y respuestas

Implementación del cuerpo del FB del componente MeIA

El cuerpo del FB (figura 105), estructurado en segmentos, contiene las instancias de los FB de los procedimientos diseñados. Este cuerpo se puede programar en cuatro de los cinco lenguajes de programación propuestos por la norma IEC 61131-3: diagrama de con-

tactos (LD), diagrama de bloques funcionales (FBD), estructurado (ST) o lista de instrucciones (IL).

▼ Título del bloque: —
CONTROL GENERAL
▶ Segmento 1: Configuración del modo de control
▶ Segmento 2: Fase I - Modo Automático
▶ Segmento 3: Fase V - Paro emergencia
▶ Segmento 4: Fase VI - Producción Normal - Operaciones de gestion Plan
▶ Segmento 5: Fase VI - Producción Normal - Operaciones gestion posiciones
▶ Segmento 6: Parte Combinacional (PC): Tabla de Producción
▶ Segmento 7: Parte Combinacional (PC): Salidas - Peticiones de Servicios y Eventos - Coordinación
▶ Segmento 8: Parte Combinacional (PC): Anillo Receta de Producción
▶ Segmento 9: Parte Combinacional (PC): Numero de Montajes

Figura 105

Cuerpo del FB para el componente MeiA

Implementación de los gemelos funcionales de los componentes de las unidades

El gemelo funcional de cada uno de los componentes MeiA de las unidades de trabajo de la célula se implementa en una POU de tipo FB que es independiente del FB del componente del control general (figura 106).

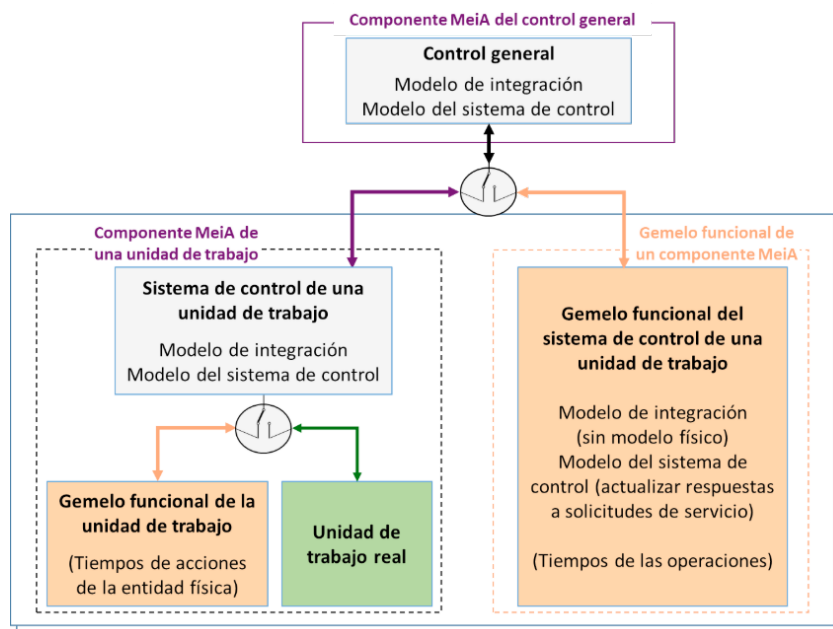


Figura 106

Los gemelos funcionales de las unidades de trabajo

La figura 107 muestra la interfaz de bloque del gemelo funcional del componente MeiA de la unidad S1-Ubicación base, donde sus entradas son los tiempos de operación, su modelo de integración recopila las solicitudes de servicio y su modelo del sistema de control contiene la información sobre las ejecuciones de los servicios.

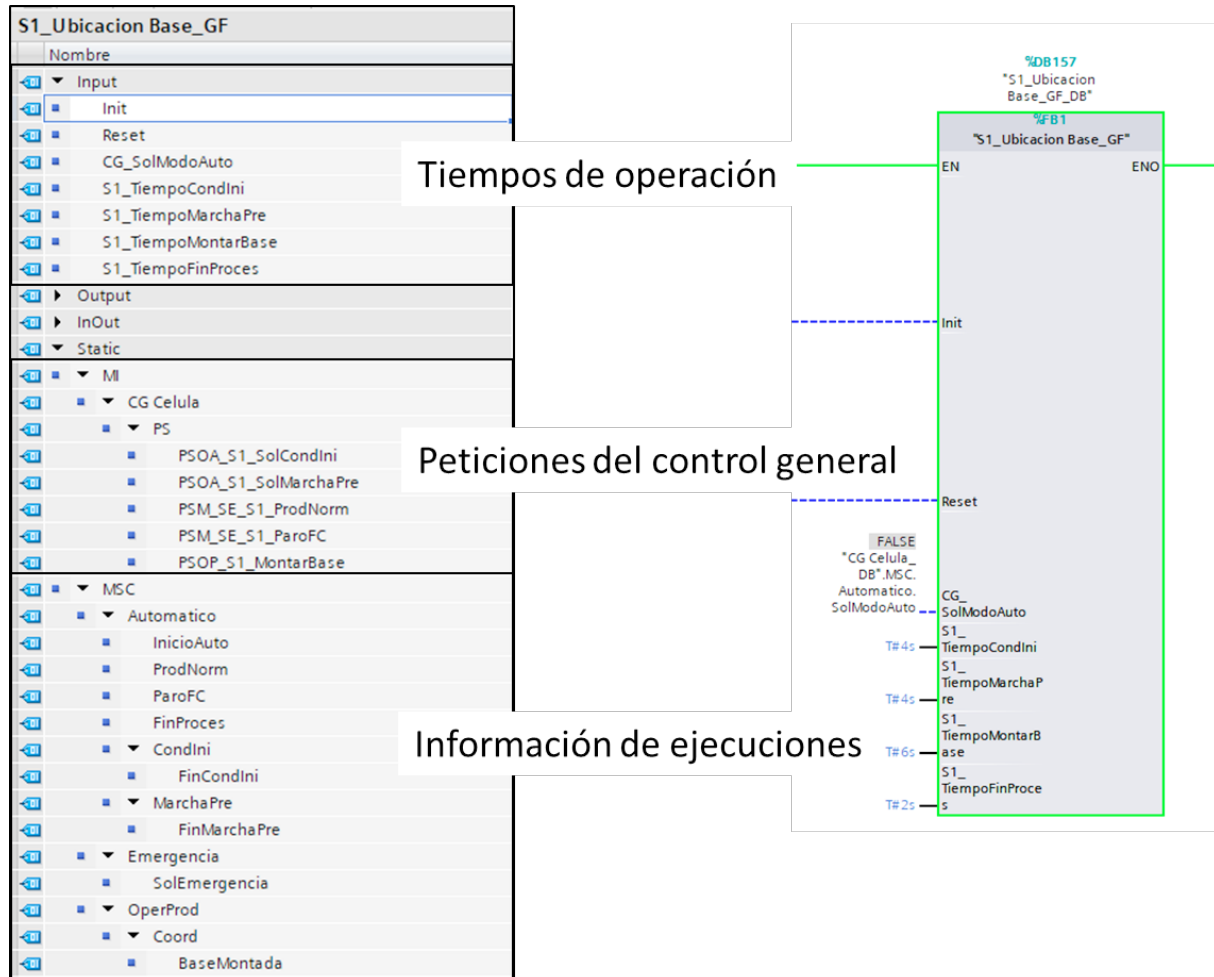


Figura 107

Interfaz de bloque del gemelo funcional del componente MeiA de la unidad de trabajo S1-Ubicación base

La interfaz del FB podría ser la misma interfaz de bloque que la del componente MeiA eliminando las entradas y salidas.

El cuerpo del FB contiene las instancias de los FB relacionados con los componentes funcionales básicos que simulan las operaciones de decisión, producción y auxiliares realizadas por la unidad de trabajo. Así, estos componentes funcionales básicos trabajan con el tiempo de ejecución de la operación concreta. Por ejemplo, cuando hay una solicitud de servicio para realizar una operación auxiliar, como el restablecimiento al estado inicial (condiciones iniciales y de seguridad), el gemelo funcional estima el tiempo de ejecución de la operación y actualiza el modelo del sistema de control para indicar el final de la operación.

Capítulo 6

Conclusiones

La metodología MeiA guía el desarrollo y la documentación de software de control modular, reutilizable y robusto para sistemas de producción automatizados, haciendo más eficiente el mantenimiento y la actualización de los proyectos de automatización conformes al estándar IEC 61131-3, que es la norma utilizada por los profesionales en la industria. Además, esta metodología emplea la terminología del dominio en el proceso de desarrollo para mejorar la comunicación entre los participantes en la automatización, instalación y puesta en marcha del sistema de producción.

Integrando las mejores prácticas de la ingeniería de software, de la ingeniería de automatización y los estándares de los modelos de referencia para la digitalización, esta metodología aborda los requisitos funcionales y no funcionales (flexibilidad, extensibilidad, seguridad y mantenibilidad) para realizar el control mediante un conjunto de sistemas de control encapsulados que interoperan. Estos componentes MeiA proporcionan un código probado con su gemelo funcional, con acceso restringido y seguro a sus procedimientos e información, extensible tanto en funcionalidad como en número, fácil de mantener y capaz de adaptarse a nuevas necesidades. Además, estos componentes están alineados conceptualmente con los sistemas ciberfísicos, los componentes I4.0 y los componentes IIoT de los modelos de referencia más usados en la digitalización de las empresas.

La integración de las tecnologías de la información con las tecnologías de operación del entorno industrial, mediante modelos de información basados en los modelos del estándar IEC 61512, permite la interoperabilidad con aplicaciones empresariales de toma de decisiones, de acuerdo con la norma IEC 62264, con objeto de alcanzar los objetivos de producción, incluso en situaciones de fallo o replanificación.

La infraestructura de soporte proporciona directrices, plantillas y herramientas que pueden ayudar a las empresas a aumentar sus capacidades digitales, especialmente a las PYME.

Las plantillas permiten la reutilización desde las primeras etapas de desarrollo, proporcionando diseños de alta calidad con menos errores durante las fases de análisis y diseño, lo que reduce los tiempos de implementación y operación. Las herramientas ayudan en la construcción de los modelos del estándar IEC 61512 y en la generación de código conforme al estándar IEC 61131-3, lo cual redundará en un proceso de reingeniería más sencillo ante cambios de configuración o reconstrucción del sistema de producción.

La metodología MeiA se ha integrado tanto en las enseñanzas de ingeniería para hacer frente a las necesidades formativas de las personas que se incorporan a la industria, como en los proyectos de investigación orientados a la innovación tecnológica y la optimización de procesos industriales, contribuyendo a generar soluciones más eficientes, seguras y sostenibles que respondan a los retos actuales y futuros de los sistemas de producción automatizados.

Capítulo 7

Referencias

- [1] International Organization for Standardization: IEC 61512-1: Batch control-part 1: Models and terminology. Technical report, IEC (August 1997). <https://webstore.iec.ch/publication/5528>
- [2] IEC 62832-1:2020. Industrial-process measurement, control and automation - Digital factory framework - Part 1: General principles.
- [3] IEC 62264, 2013. Enterprise-control system Integration-Part 1: Models and terminology.
- [4] NIST (National Institute of Standards and Technology). (2017). Framework for Cyber-Physical Systems: Volume 1, Overview (NIST Special Publication 1500-201). <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-201>
- [5] NIST (National Institute of Standards and Technology) (2016). Reference Architecture for Smart Manufacturing Part 1: Functional Models (NIST AMS 300-1). <https://www.nist.gov/publications/reference-architecture-smart-manufacturing-part-1-functional-models-0>
- [6] International Electrotechnical Commission. (2017). IEC PAS 63088:2017. Smart Manufacturing – Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI4.0), IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/30082>
- [7] IIC (Industry IoT Consortium). (2022). The industrial internet reference architecture (version 1.10). Technical report, IIC. <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/IIRA-v1.10.pdf>
- [8] International Organization for Standardization: IEC 61131-3: Programmable controllers - part 3: Programming languages. Technical report, IEC (2013). <https://webstore.iec.ch/publication/4552>
- [9] Álvarez, M.L., Sarachaga, I., Burgos, A., Iriondo, N.: Gemelos funcionales para validar el software de control. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 21(2), 159-170 (2024) <https://doi.org/10.4995/riai.2024.20830>
- [10] International Organization for Standardization: Systems and software engineering – software life cycle processes. International organization for standardisation. Technical report, ISO/IEC/IEEE (2017). <https://www.iso.org/standard/63712.html>

- [11] Alvarez, M.L., Estévez, E., Sarachaga, I., Burgos, A., Marcos, M.: A novel approach for supporting the development cycle of automation systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68(1-4), 711-725 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4793-4>
- [12] ADEPA: GEMMA (Guide d'Etude des modes de marches et d'arrêts). Technical report, ADEPA (1981).
- [13] Eclipse: Sirius. Accedido: 2025-01-29 (2025). <https://www.eclipse.org/sirius/>
- [14] IEC: IEC 60848: GRAFCET Specification language for sequential function charts. Technical report, IEC (August 2013). <https://webstore.iec.ch/publication/3684>
- [15] Siemens. TIA Portal – Totally Integrated Automation Portal. Disponible en: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html>
- [16] Izquierdo, R. (2024). The Complete Simulation Tool for Automation Training and Simulation. Machines Simulator v4.1 Instruction Guide. Nirtec. <https://www.nirtec.com>

Fases de análisis de la metodología MeiA

La metodología MeiA para el desarrollo de software de control en el ámbito de la ingeniería de automatización de procesos se estructura en seis fases, que abordan el sistema de control desde distintas perspectivas mediante una secuencia ordenada de pasos en cada fase.

A continuación, se realiza una descripción de cada una de las seis fases, junto con sus respectivos pasos. Para ello, se utilizan imágenes que, en su parte izquierda, muestran un diagrama de cada fase, y en la parte derecha, una tabla con una breve descripción de cada paso.

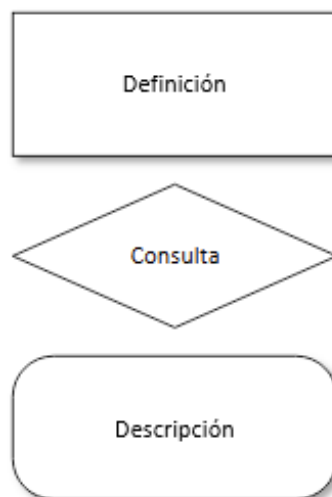


Figura 109

Elementos para interpretar las fases de la metodología MeiA

La figura 109 muestra tres tipos de elementos, los cuales se interpretan de la siguiente manera:

- Rectángulo con esquinas rectas: representa una definición relacionada con la puesta en marcha y la parada de los modos de funcionamiento, así como de las funcionalidades auxiliares.
- Rombo: representa una consulta sobre la necesidad de realizar un determinado análisis dentro de un paso.
- Rectángulo con esquinas redondeadas: representa la descripción del proceso resultante del análisis realizado.

Fase I. Secuencia principal-Modo automático

En esta fase se establece la secuencia principal del sistema, que organiza tanto el arranque del sistema en modo automático como la parada programada del mismo, generando las señales de mando que informan a producción normal sobre el estado del sistema en cada momento.

Para establecer el funcionamiento en modo automático del sistema se deben realizar los siguientes pasos (figura 110):

Paso 1. Solicitud de funcionamiento modo automático. Establecer la **forma de activar o poner en marcha el sistema en modo automático**; por ejemplo, mediante un pulsador de marcha, con un conmutador automático/manual, desde un sistema de supervisión, mediante otro proceso que marca el arranque, etc.

Paso 2. Inicialización parte operativa-Condiciones iniciales y de seguridad. Identificar la **situación de partida conocida y segura** en la que debe estar el proceso cuando se solicita su funcionamiento automático, así como las **acciones a realizar para alcanzar dicha situación**. Esto implica el estudio de los elementos del proceso:

- Analizar el efecto de la presencia de alimentación por primera vez en cada uno de los pre-accionamientos y accionamientos del proceso, lo cual proporcionará información tanto de los aspectos a tener en cuenta para la seguridad del personal de planta, como de la situación inicial del proceso.
- Determinar la ubicación de todos los elementos en la situación de partida: posición de los elevadores, pinzas o mordazas abiertas o cerradas, cilindros extendidos o recogidos, situación de piezas, etc., prestando especial atención a las posibles situaciones en el arranque que requieran acciones para llevar al sistema a la situación de partida.
- Identificar situaciones no controlables y su resolución: intervención del personal de planta, inclusión de nuevos actuadores, sensores, indicadores, etc.
- Establecer el procedimiento de comprobación que garantice que los componentes del sistema se encuentran en una situación determinada y conocida.

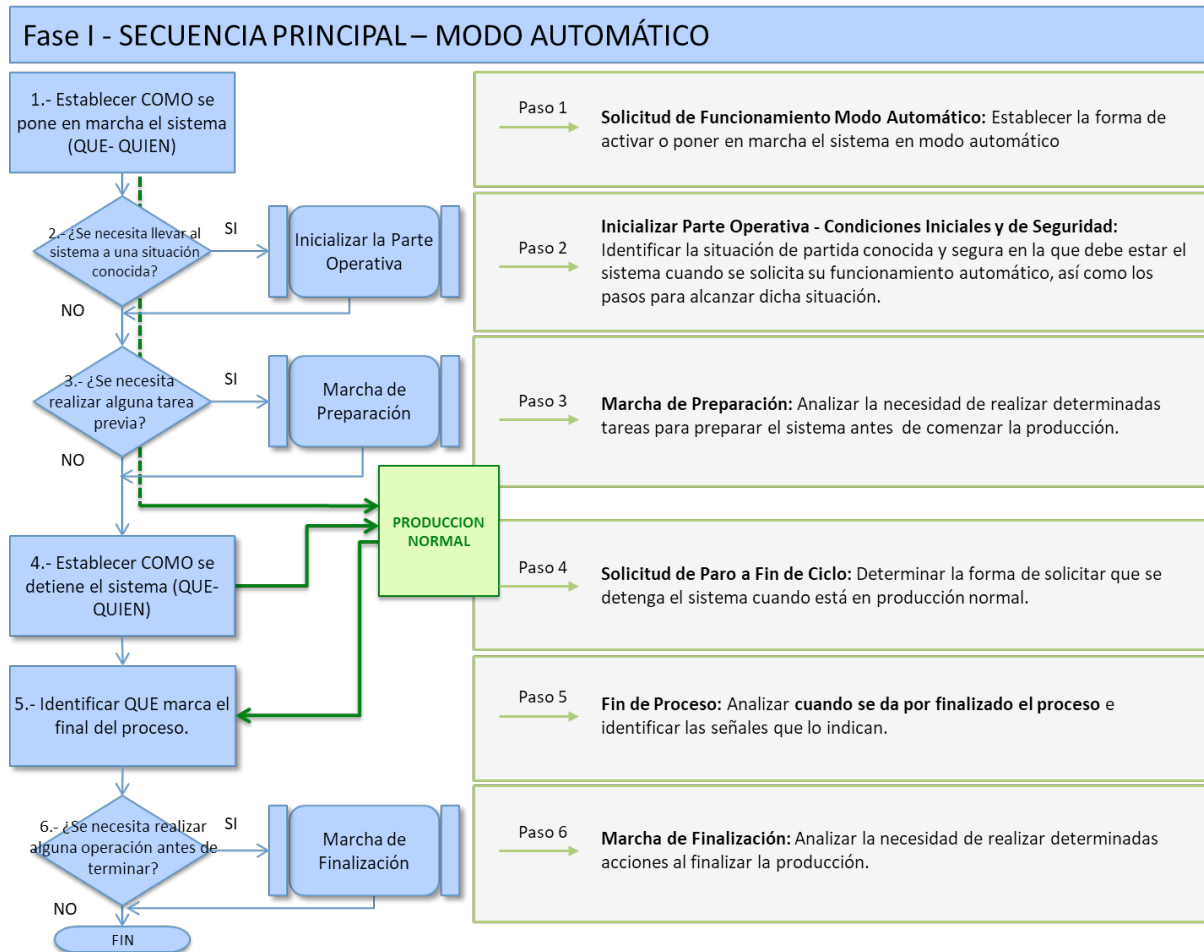


Figura 110

Pasos de la Fase I: Secuencia principal-Modo automático

- Paso 3. Marcha de preparación.** Analizar la necesidad de realizar determinadas tareas para **preparar el sistema antes de comenzar la producción**; por ejemplo, carga de almacenes, carga de herramientas, preparación de utillajes, llenado de tanques, precalentamiento de equipos, etc.
- Paso 4. Solicitud de paro a fin de ciclo.** Determinar la forma de **solicitar que se detenga el proceso** cuando está en producción normal; por ejemplo, mediante un pulsador de parada a fin de ciclo, por solicitud desde otro proceso, por solicitud tras haberse producido un fallo, al terminar algún tipo de materia prima, al finalizar el plan de producción, etc.
- Paso 5. Fin de proceso.** Analizar **cuándo se da por finalizado el proceso** e identificar las señales que indican que se ha terminado el último ciclo de producción; por ejemplo, cuando finalizan ciertos procedimientos de producción tras finalizar un lote, al terminar algún tipo de materia prima, etc.
- Paso 6. Marcha de finalización.** Analizar la necesidad de realizar determinadas **acciones al finalizar la producción**; por ejemplo, operaciones de vaciado y/o limpieza de alguna máquina, calibración de alguna máquina, cambios de herramientas, medidas de herramientas, etc.

Fase II. Modo manual

En esta fase se organiza tanto el arranque como la parada del sistema para funcionar manualmente. Para ello, se analiza la necesidad de verificar individualmente ciertos movimientos o partes del proceso sin respetar el orden habitual del ciclo, normalmente bajo el control del personal de mantenimiento; por ejemplo, para realizar el reajuste o calibración de ciertos sensores y/o actuadores, para ejecutar ciertas operaciones de mantenimiento preventivo, correcciones por desgaste, para solventar fallos, etc.

En el caso de requerir este modo de funcionamiento será necesario identificar la forma de activar/desactivar este modo de funcionamiento, evaluar la prioridad del modo manual frente al modo automático, determinar los elementos de control disponibles para realizar las acciones del proceso de forma manual, y analizar la situación del proceso al finalizar el modo. Todos estos aspectos tienen gran influencia tanto en la elección de los controles a incluir en el sistema de supervisión/control, como en el diseño del panel de operación y de paneles auxiliares.

Para establecer el funcionamiento en modo manual del sistema se deben realizar los siguientes pasos (figura 111):

Paso 1. Solicitud de funcionamiento modo manual. Establecer la **forma de activar** este modo de funcionamiento; por ejemplo, mediante un conmutador automático/manual o un pulsador de modo manual, desde un sistema SCADA u otro proceso, al producirse alguna situación determinada en el proceso como fallo o emergencia, etc. En cualquier caso, será necesario identificar **desde qué estados** puede activarse este modo de funcionamiento: parado en estado inicial y/o en estado de fallo y/o en estado de emergencia, o desde cualquier estado en el caso de manual prioritario.

Paso 2. Manual prioritario-Parada inmediata. Si el modo manual es prioritario, su activación implica **detener el proceso de forma inmediata** con independencia del estado en el que se encuentre y realizar las acciones necesarias para llevar al sistema a una situación de parada segura, tanto desde el punto de vista de producción como de seguridad humana. Por tanto, será necesario:

Paso 2.1. Parada segura. Identificar acciones previas a la desactivación del modo automático, analizando si hay algún accionamiento que deba quedar activado o ser activado tras la detención; por ejemplo, algún tipo de manipulador o accionador que sujete una pieza o pueda estar manipulándola (electroimán, ventosa, cilindro, etc.), sistemas de refrigeración o calentamiento, elementos de contención, indicadores luminosos, acústicos, etc.

Paso 2.2. Desactivación del proceso automático. Determinar los procedimientos que deben continuar activados al producirse el paso a manual y cuáles serán desactivados; por ejemplo, pueden quedar activados procesos de seguridad, de controles de niveles, temperaturas, etc.

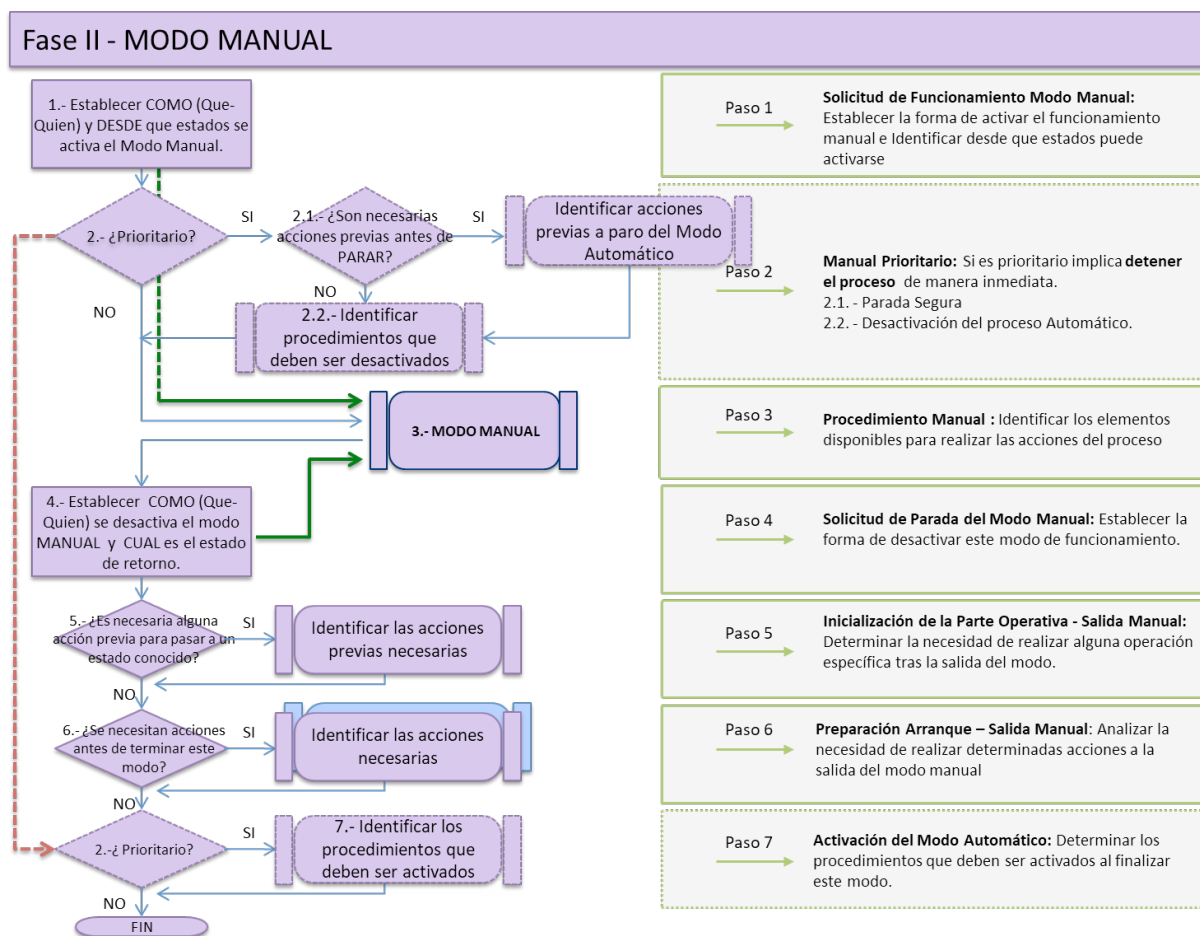


Figura 111

Pasos de la Fase II: Modo manual

- Paso 3. Procedimiento manual-Controles.** Identificar los **elementos de control disponibles** para realizar las acciones del proceso: un conjunto de pulsadores del panel de control, un conjunto de controles del sistema SCADA, o ambas posibilidades con un conmutador local/remoto que permita realizar la selección. En cualquier caso, será necesario evaluar cada una de las acciones para determinar si precisan medidas de seguridad; por ejemplo, limitar el recorrido de avance de un cilindro, comprobar que no existen obstáculos al bajar una puerta, etc.
- Paso 4. Solicitud parada del funcionamiento modo manual.** Establecer la forma de **desactivar este modo de funcionamiento**; por ejemplo, mediante un conmutador automático/manual, desde un sistema SCADA u otro proceso, al solventarse un fallo, al solucionarse una emergencia, etc.
- Paso 5. Inicialización parte operativa-Salida de manual.** Determinar la necesidad de realizar acciones específicas para asegurar el estado de ciertos elementos del proceso tras la salida del modo manual. Si dichas acciones no se contemplan en las condi-

ciones iniciales, se puede o bien **enriquecer las condiciones iniciales y de seguridad** (Fasel.Paso2) para que se consideren, o bien realizar dichas acciones antes de salir del modo manual (Pre-posicionamiento de la parte operativa).

Paso 6. Preparación de arranque-Salida de manual. Analizar la necesidad de realizar determinadas acciones a la salida del modo manual; por ejemplo, operaciones de vaciado y/o limpieza de alguna máquina, calibración, etc. Determinar si es viable **adaptar la marcha de finalización** para contemplar esta situación (Fasel.Paso6).

Paso 7. Activación del modo automático. Si el modo manual es prioritario, determinar los procedimientos que deben ser activados al finalizar el modo.

Fase III. Modos de pruebas

En esta fase se analiza la necesidad de verificar paso a paso o de forma continua ciertos movimientos o partes del proceso, respetando el orden habitual del ciclo según el ritmo que marque el personal a cargo de dicha tarea. Por lo tanto, será necesario evaluar el tipo de funcionamiento y la forma de activar/desactivar dicho modo que afectará al diseño de los controles a incluir en el sistema de supervisión/control y/o al diseño del panel de operación y de paneles auxiliares.

Los tipos de funcionamiento que se contemplan son paso a paso para un avance ordenado fijado, por ejemplo, mediante la activación de un pulsador, o bien por bloque funcional para la puesta a punto de una parte del proceso (o varias), requiriendo seleccionar el bloque y activar su marcha.

Para establecer el funcionamiento de un bloque funcional se deben realizar los siguientes pasos (figura 112):

Paso 1. Solicitud de funcionamiento de bloque. Establecer la **forma de activar** este modo de funcionamiento; por ejemplo, con un conmutador para seleccionar el bloque con un pulsador de marcha, arranque desde otro proceso, etc. El sistema debe estar en estado Inicial. Si estuviese en otro estado, se deberá asegurar que no interfiera con el resto del proceso.

Paso 2. Inicialización parte operativa-Bloque. Identificar las condiciones iniciales y de seguridad que debe cumplir la parte del proceso que se desea poner en marcha y **adaptar las condiciones iniciales y de seguridad** (Fasel.Paso2) para que se consideren y se puedan solicitar, o bien realizar dichas acciones antes de comenzar.

Paso 3. Marcha de preparación-Bloque. Analizar la necesidad de realizar determinadas tareas para preparar el bloque antes de comenzar su funcionamiento normal y **adaptar la marcha de preparación** (Fasel.Paso4) para que se consideren y se puedan solicitar, o bien realizar dichas tareas antes de comenzar.

Paso 4. Control marcha bloque. Establecer los controles que permitirán el arranque del bloque; por ejemplo, con un pulsador.

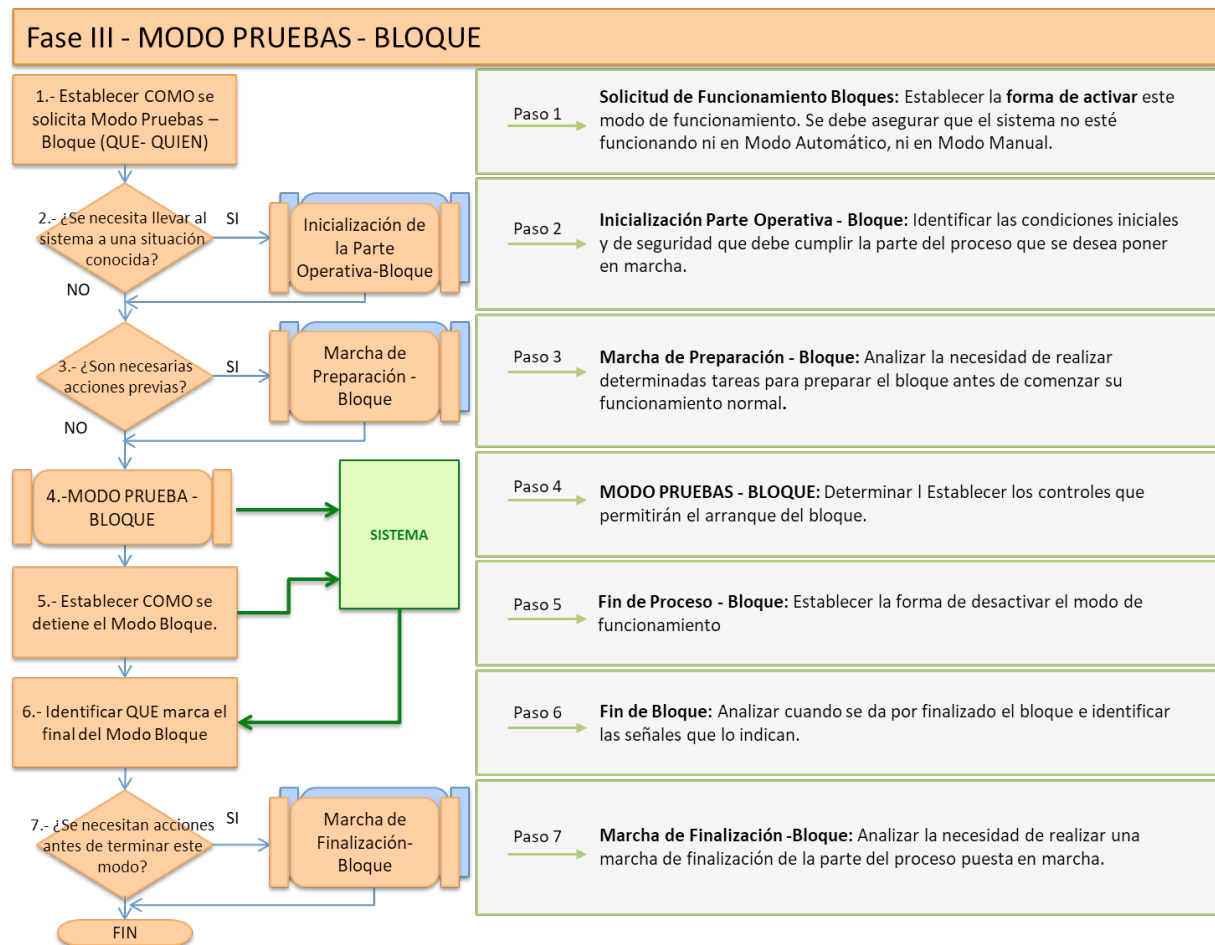


Figura 112

Pasos de la Fase III: Modo de pruebas-Bloque

Paso 5. Solicitud parada del funcionamiento bloque. Establecer la forma de **desactivar el modo de funcionamiento**; por ejemplo, con un pulsador de parada, al desactivar el selector del bloque, etc.

Paso 6. Fin de bloque. Analizar **cuándo se da por finalizado el bloque** e identificar las señales que indican que se ha terminado; por ejemplo, cuando finalizan los procedimientos de producción que se están probando, al terminar algún tipo de materia prima, etc.

Paso 7. Marcha de finalización-Bloque. Analizar la necesidad de realizar una marcha de finalización de la parte del proceso puesto en marcha y **adaptar la marcha de finalización** (FaseI.Paso6) para contemplar esta situación, o bien realizar dichas acciones.

Para establecer el funcionamiento Paso a Paso se deben realizar los siguientes pasos (figura 113):

- Paso 1. Solicitud de funcionamiento paso a paso.** Establecer la **forma de activar** este modo de funcionamiento; por ejemplo, con un conmutador de paso.
- Paso 2. Control avance paso a paso.** Establecer los controles que permitirán el avance de los pasos; por ejemplo, mediante un pulsador.
- Paso 3. Solicitud parada del funcionamiento paso a paso.** Establecer la forma de **desactivar el modo de funcionamiento**; por ejemplo, con un pulsador de parada, al desactivar un selector, etc.

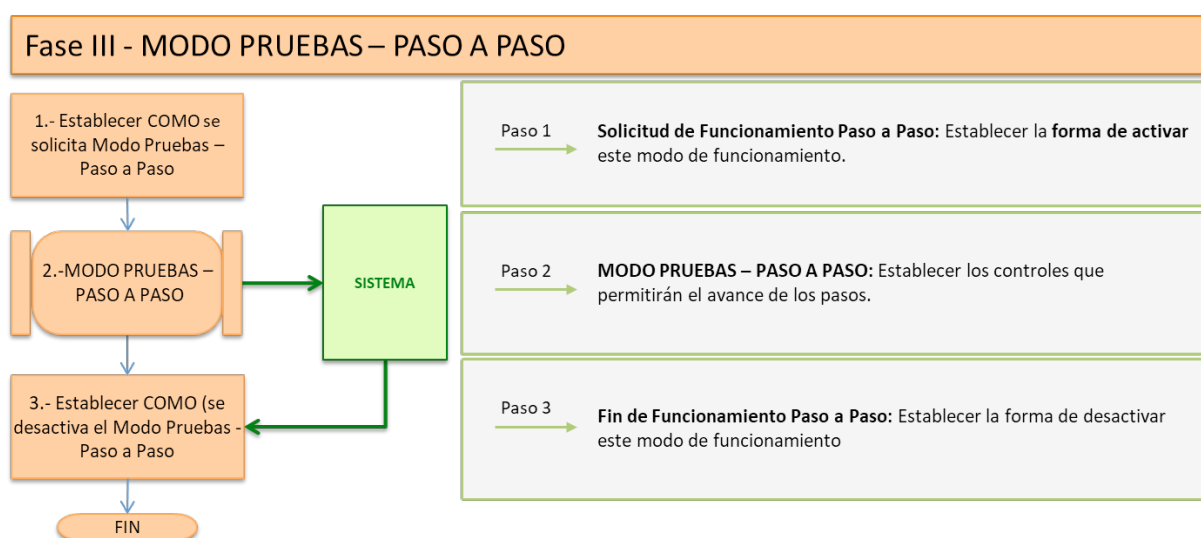


Figura 113

Pasos de la Fase III: Modo de pruebas-Paso a paso

Fase IV. Fallos

En esta fase se identifican, analizan y evalúan los fallos que pueden producirse en el proceso, identificando dos tipos: aquéllos que permiten que el sistema siga en producción (incluso aceptando degradación de la calidad del producto) y aquéllos que forzosamente harán evolucionar el sistema hacia una parada controlada. Aunque cada posible fallo se analizará de forma independiente, se podrán agrupar aquellas situaciones que requieran tratamientos similares. Para cada situación de fallo se deben realizar los siguientes pasos (figura 114):

- Paso 1. Detección de fallo.** Identificar la forma de **detectar la situación de fallo**; por ejemplo, con información proveniente del proceso productivo de sensores de detección de estados de error, situaciones controladas por temporizadores que marcan el tiempo límite para la realización de ciertas tareas, contadores de errores, etc.

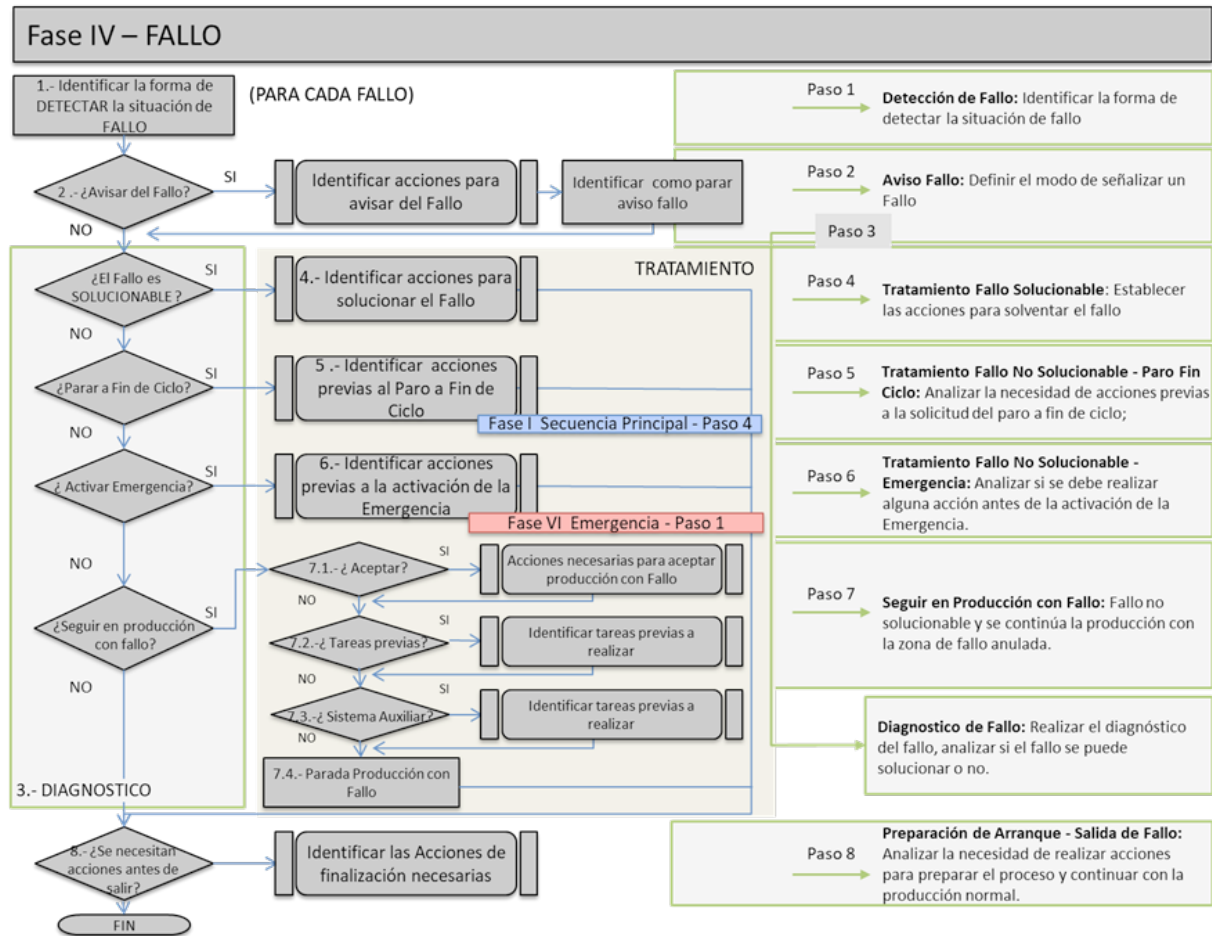


Figura 114

Pasos de la Fase IV: Fallos

- Paso 2. Aviso fallo.** Definir el procedimiento de **aviso del fallo**, identificar el modo de señalizarlo (por ejemplo, mediante señales luminosas en los paneles de operación, mensajes, etc.) y determinar la forma de solicitar la parada del aviso.
- Paso 3. Diagnóstico de fallo.** Realizar el **diagnóstico del fallo** para establecer si el fallo se puede solucionar. Si el fallo no se puede solucionar, será necesario evaluar si se solicita un paro a fin de ciclo, si se continúa la producción con la zona de fallo anulada o si se activa la emergencia para detener el proceso.
- Paso 4. Tratamiento fallo solucionable.** Establecer las **acciones para preparar el proceso** en el área afectada; por ejemplo, detener el proceso en una zona para facilitar su reparación, activar algún accionamiento para liberar sujeciones, mover algún dispositivo para facilitar el acceso, realizar un paro en caliente, etc. Asimismo, identificar las **acciones a realizar para solventar el fallo**; por ejemplo, pasando al modo manual, realizando un tratamiento específico, etc.

Cuando se precise un paro en caliente que provoca la detención inmediata del proceso y la reanudación en el punto en el que se detuvo una vez desactivado, será necesario:

1. Establecer la forma de activar el paro en caliente (por ejemplo, mediante un pulsador de paro en caliente) e identificar en qué estado debe estar el sistema para permitir su activación.
2. Analizar el proceso para identificar aquellas acciones que no pueden ser detenidas o que pueden originar una degradación del proceso superado un tiempo (por ejemplo, un horno que debe mantener una temperatura determinada, sistemas de seguridad...).
3. Establecer la forma de desactivar el paro en caliente.

En el caso de un paso a funcionamiento manual para solucionar el fallo, se deberá considerar la forma de desactivar este modo de funcionamiento e incluirlo en la **Solicitud parada del funcionamiento modo manual** (FaseII.Paso4).

Paso 5. Tratamiento fallo no solucionable-Paro fin ciclo. Analizar si se debe realizar alguna **acción previa a la solicitud del paro a fin de ciclo**; por ejemplo, retirada de alguna pieza en curso, finalización de algún proceso previo, etc. La solicitud se deberá incluir en la **Solicitud de paro a fin de ciclo** (FaseI.Paso4).

Paso 6. Tratamiento fallo no solucionable-Emergencia. Analizar si se debe realizar alguna **acción antes de la activación de la emergencia**. La solicitud se deberá incluir en la **Solicitud parada de emergencia** (FaseV.Paso1).

Paso 7. Seguir en producción con fallo. Cuando se trata de un fallo no solucionable y se continúa la producción con la zona de fallo anulada, se deben realizar los siguientes pasos:

Paso 7.1. Aceptar producción con fallo. Evaluar la necesidad de **aceptar el modo de funcionamiento** producción con fallo, dado que puede suponer una degradación de la calidad o pérdida total del producto. En su caso, identificar los **controles** para realizar dicha validación.

Paso 7.2. Marcha de preparación producción con fallo. Evaluar si es necesario realizar alguna **acción previa antes de comenzar** con este modo de funcionamiento; por ejemplo, detener alguna parte del proceso, modificar la ruta del sistema de transporte, aprovisionar algún almacén, etc. Además, se deben **identificar las señales** necesarias para comunicar la anulación de parte del proceso a Producción Normal.

Paso 7.3. Marcha sistema auxiliar por fallo. En aquellos casos que sea necesario, diseñar y establecer cómo poner **en marcha un nuevo proceso auxiliar**; por ejemplo, una persona realiza la operación manualmente y dispone de controles para indicar el fin de la operación al proceso, un sistema alternativo, etc.

Paso 7.4. Solicitud parada de producción con fallo. Determinar la forma de parar este modo de funcionamiento una vez solventada la situación de fallo.

Paso 8. Preparación de arranque-Salida de fallo. Analizar la necesidad de realizar determinadas **acciones a la salida del fallo** para preparar el proceso y continuar con la producción normal.

Fase V. Paro de emergencia

En esta fase se organiza tanto el arranque como la parada del sistema para el tratamiento de emergencias. En la mayoría de los procesos, las emergencias se tratan como un módulo autónomo del controlador tanto a nivel de hardware como de software. No obstante, dado que la información de activación de las emergencias llega al controlador, el software de control debe contemplar tal situación y realizar la parada inmediata del proceso de forma segura, establecer el protocolo de actuación y la nueva puesta en marcha del sistema.

Para establecer el procedimiento de Emergencia del sistema se deben realizar los siguientes pasos (figura 115):

Paso 1. Solicitud de emergencia. Establecer la **forma de activar la parada de emergencia**; por ejemplo, al activar la seta de emergencia, tras la evaluación de un fallo no solucionable (FaseIV.Paso6), por situaciones del proceso al alcanzar una temperatura límite, etc.

Paso 2. Emergencia-Parada inmediata. La activación de la emergencia implica **detener el proceso de forma inmediata** con independencia del estado en el que se encuentre y realizar las acciones necesarias para llevar al sistema a una situación de parada segura, tanto desde el punto de vista de producción como de seguridad humana (FaseII.Paso2). Por tanto, será necesario:

Paso 2.1. Parada segura emergencia. Analizar si hay algún accionamiento que deba quedar activado o ser activado tras la detención; por ejemplo, algún tipo de manipulador o accionador que sujete una pieza o pueda estar manipulándola (electroimán, ventosa, cilindro, etc.), sistemas de refrigeración o calentamiento, bloqueos mecánicos, elementos de contención, indicadores luminosos, acústicos, etc. (FaseII.Paso2.1).

Paso 2.2. Desactivación del modo automático. Determinar los procedimientos que deben continuar activados al producirse la emergencia y cuáles serán desactivados (FaseII.Paso2.2).

Paso 3. Aviso de emergencia. Definir el procedimiento de aviso de emergencia, identificar el modo de **señalizar la emergencia** (por ejemplo, mediante señales luminosas en los paneles de operación, mensajes, etc.) y determinar la forma de solicitar la parada del aviso.

Paso 4. Procedimiento de emergencia-Protocolo de actuación. Analizar la posibilidad de realizar un diagnóstico de la emergencia para averiguar el origen y tratamiento de la misma. Asimismo, identificar las acciones a realizar; por ejemplo, pasando al modo manual, realizando un tratamiento específico, etc. En el caso de un paso a manual, se deberá considerar la forma de desactivar este modo de funcionamiento e incluirlo en la **Solicitud de parada del funcionamiento del modo manual** (FaselI.Paso4).

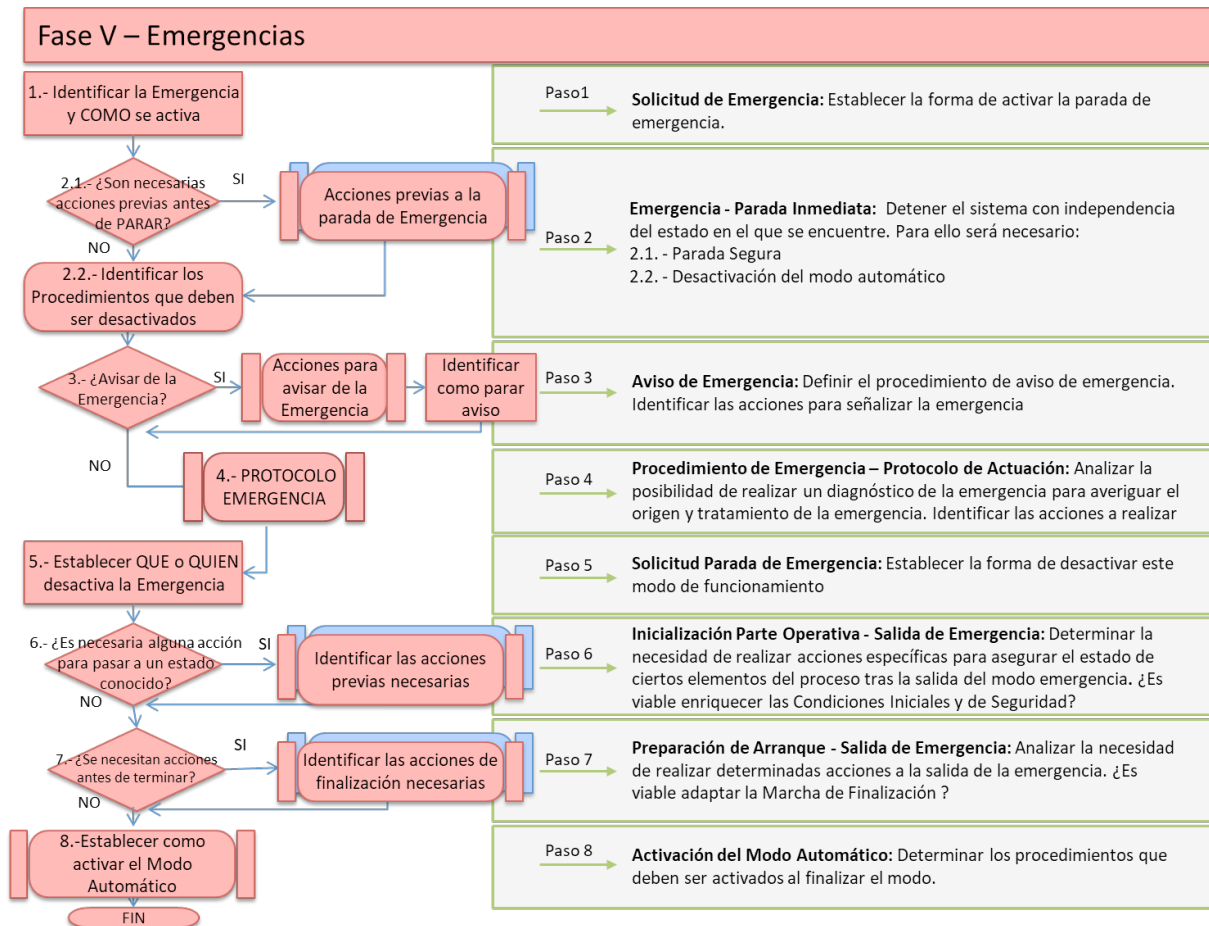


Figura 115

Pasos de la Fase V: Paro de emergencia

Paso 5. Solicitud parada de emergencia. Establecer la forma de **desactivar** este modo de funcionamiento; por ejemplo, mediante el desenclavamiento de la seta de emergencia y un pulsador de rearme, al solucionarse el problema que la originó, tras finalizar el procedimiento de emergencia, etc.

Paso 6. Inicialización Parte Operativa-Salida de emergencia. Determinar la necesidad de realizar acciones específicas para asegurar el estado de ciertos elementos del proceso tras la salida del modo emergencia. Si dichas acciones no se contemplan en las condiciones iniciales, se puede o bien **enriquecer las condiciones iniciales y de seguridad** (Fasel.Paso2) para que se consideren, o bien realizar dichas acciones antes de salir de la emergencia (Preposicionamiento de la parte operativa).

Paso 7. Preparación de arranque-Salida de emergencia. Analizar la necesidad de realizar determinadas acciones a la salida de la emergencia; por ejemplo, operaciones de vaciado y/o limpieza de alguna máquina, calibración, etc. En su caso, determinar si es viable **adaptar la marcha de finalización** para contemplar esta situación (Fasel. Paso6).

Paso 8. Activación del modo automático. Determinar los procedimientos que deben ser activados al finalizar el modo.

Fase VI. Producción normal

En esta fase se analizan las operaciones del proceso, se establece el orden de realización definiendo el ciclo normal de producción, y se identifican, analizan y diseñan los procedimientos que realizarán dichas operaciones.

Las operaciones del proceso se descomponen en tareas coordinadas realizadas por uno o varios procedimientos, distinguiendo:

- Procedimientos principales que realizan las operaciones principales de producción; por ejemplo, pintado, transporte, prensado, etc.
- Procedimientos de coordinación de operaciones, procedimientos de selección de parámetros de producción, procedimientos que gestionan la concurrencia de elementos en el proceso, selección de productos, etc.
- Procedimientos de información que gestionan la generación de avisos al personal de planta, procedimientos específicos para suministrar información al sistema de supervisión/control de alto nivel, procedimientos de seguridad, etc.
- Procedimientos que realizan operaciones auxiliares relacionadas con la Marcha de Preparación; por ejemplo, carga de almacenes, llenado de tanques, precalentamiento de equipos, etc.

El análisis y diseño de los procedimientos que desempeñan las operaciones de producción normal se pueden realizar de forma progresiva, y siempre teniendo en cuenta las señales provenientes de las restantes fases (señales internas). Para ello, los pasos a seguir son los siguientes (figura 116):

Paso 0. Operaciones del proceso-Procedimientos. Identificar las operaciones del proceso, los procedimientos que las realizan y su orden de ejecución. Por cada procedimiento se deben realizar los siguientes pasos:

Paso 1. Marcha del procedimiento. Establecer la forma de poner en marcha el procedimiento; por ejemplo, cuando se activa un sensor que indica la presencia de una pieza, al alcanzar un nivel en un tanque, al transcurrir un tiempo desde un evento concreto, al ser activado desde otro procedimiento, al finalizar algún tipo de materia prima, etc. Por lo tanto, también habrá que identificar las *señales internas* a tener en cuenta para su puesta en marcha.

Otras consideraciones a tener en cuenta:

- Los procedimientos principales y de coordinación precisan que el sistema de control esté preparado para su puesta en marcha.
- Los procedimientos que realizan operaciones auxiliares necesarias durante el ciclo de producción deberán ser diseñados para su activación desde los procedimientos de Marcha de Preparación y de Producción Normal. En estos casos se sugiere utilizar una señal interna para identificar la operación auxiliar (coordinación horizontal).

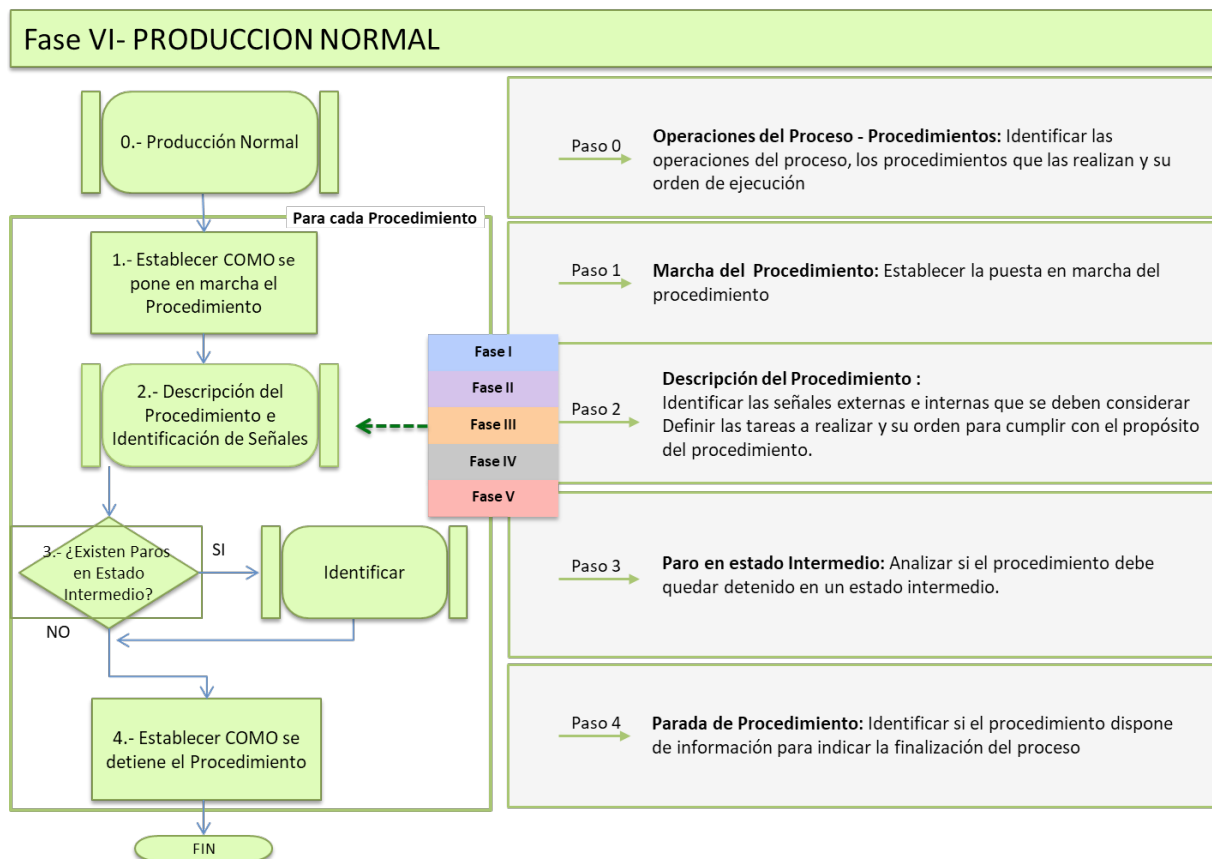


Figura 116

Pasos de la Fase VI: Producción normal

Paso 2. Descripción del procedimiento:

Paso 2.1. Identificación de señales. Identificar las *señales externas*, sensores y actuadores, señales del panel de operación y aquéllas que provienen del supervisor, así como las *señales internas* procedentes de las restantes fases que deben ser consideradas en el procedimiento. Cuando el procedimiento deba solicitar la activación de otros procedimientos, también se deben identificar las *señales internas* necesarias para llevar a cabo dichas activaciones.

- Paso 2.2. Tareas.** Definir las tareas a realizar y su orden para cumplir con el propósito del procedimiento.
- Paso 3. Paro en estado intermedio.** Analizar si el procedimiento debe quedar detenido en un estado intermedio (por ejemplo, en situaciones de aprovisionamiento de materia prima, retirada de piezas, gestión de herramientas, medios de transporte, etc.), considerando que siempre que se requiera la intervención del personal se deberá asegurar el paro del proceso. En su caso, identificar las señales que indican la parada, su finalización y las acciones a realizar.
- Paso 4. Parada del procedimiento.** Determinar cómo afecta la solicitud de paro a fin de ciclo al procedimiento, e identificar si el procedimiento dispone de información para indicar la finalización del proceso.