

Pere Ponsa Asensio  
Ramon Vilanova Arbós

# Automatización de procesos mediante la guía GEMMA



# Automatización de procesos mediante la guía GEMMA



Pere Ponsa Asensio  
Ramon Vilanova Arbós

# Automatización de procesos mediante la guía GEMMA

Primera edición: noviembre de 2005

Diseño de la cubierta: Jordi Calvet

© los autores, 2005

© Edicions UPC, 2005  
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL  
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona  
Tel.: 934 016 883 Fax: 934 015 885  
Edicions Virtuals: [www.edicionsupc.es](http://www.edicionsupc.es)  
E-mail: [edicions-upc@upc.edu](mailto:edicions-upc@upc.edu)

Producción: TECFOTO  
Ciutat de Granada 55, 08005 Barcelona

Depósito legal: B- 50930-2005  
ISBN: 84-8301-811-X

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

## Presentación

Durante años se han publicado diversas obras que tratan la automatización. Buena parte de estos libros se centran en el controlador lógico programable. Uno de los problemas de este tipo de obras es el cambio tecnológico en esta área, lo que conlleva que los modelos de controladores que se detallan queden rápidamente superados. Algunas obras están centradas en la representación gráfica mediante GRAFCET y la programación de controladores mediante lenguajes de programación como, por ejemplo, el esquema de contactos. En los últimos años, el uso de GRAFCET se ha extendido y es de uso común en el ámbito docente universitario y en aplicaciones industriales. Este libro propone un salto cualitativo en esta área de conocimiento mediante el desarrollo sistemático de la guía GEMMA como metodología de uso genérico a utilizar para cubrir aspectos de supervisión y automatización. El enfoque planteado es complementario al que se ofrece en otras obras de automatización.

Cabe destacar que la guía GEMMA planteada por algunos autores se centra en los conocimientos teóricos, con algún ejemplo básico. Entendemos que, para la mejor difusión y uso de la guía GEMMA, conviene desarrollar un conjunto extenso de ejemplos y problemas. De hecho, en las siguientes páginas se potencia la reflexión del lector sobre cuál es el problema y cómo abordarlo; es muy probable que en el desarrollo de proyectos industriales los problemas sean más complejos y conviene tener una metodología clara que permita enfrentarse a ellos con un mínimo de rigor. Con ello se pretende aprovechar los conocimientos sobre GRAFCET y ofrecer una metodología aplicada sobre las posibles contingencias de un sistema y su gobernabilidad. Esta metodología permite el tratamiento de complejos problemas de automatización, mediante una estructura modular ordenada. Además, la guía GEMMA comporta el estudio de algunos aspectos tecnológicos como, por ejemplo, el diseño del panel de mando. Ello incide en el detalle de que no se trata tan sólo de una metodología teórica, sino que se utilizan de forma profunda los conocimientos adquiridos de sensorica, neumática, interacción persona-máquina, mantenimiento y seguridad.

El libro está estructurado ofreciendo la combinación de los contenidos básicos teóricos de GRAFCET y la guía GEMMA, junto a ejemplos elementales, problemas de complejidad mediana y finalmente mediante un caso ilustrativo del ámbito industrial. Con este enfoque, los autores consideran que la guía GEMMA se ajusta tanto al ámbito del estudiante de ingeniería como al profesional del sector de la automatización.

El capítulo 1 (*Fundamentos*) presenta el marco genérico teórico que engloba la evolución histórica del control de procesos industrial; aborda diversas definiciones sobre supervisión y automatización, y conduce finalmente a la necesidad de contribuir al desarrollo de metodologías integradoras y necesarias como la guía GEMMA.

El capítulo 2 (*GRAFCET*) aborda la representación estándar que se utiliza en automatización. GRAFCET es una representación del control secuencial que permite abordar un gran número de problemas de automatización y es fácilmente traducible a algoritmos de programación. De ahí que se

haya difundido en el área de automatización como un estándar *de facto* y se muestra muy manejable para tareas docentes. El capítulo se complementa con algunos ejemplos didácticos.

El capítulo 3 (*Aspectos básicos de la guía GEMMA*) introduce los aspectos elementales de la metodología para el estudio de los modos de marcha y paradas de los sistemas automatizados. El enfoque presentado en este capítulo pretende hacer reflexionar al lector para que aprenda mientras utiliza la guía (*learning by doing*), de manera que pueda ser útil para aquellos profesionales de la automatización que llevan muchos años trabajando en proyectos en los que intervienen autómatas programables, estudiantes de ciclos formativos de grado superior, ingenieros técnicos industriales o, en general, usuarios interesados en la automatización de sistemas.

El capítulo 4 (*Diseño estructurado con la guía GEMMA*) introduce los aspectos avanzados de la metodología para el estudio del tratamiento de situaciones que deterioran el funcionamiento normal de máquina o proceso: en concreto, la presencia de defectos y/o fallos. El enfoque presentado en este capítulo es del tipo *top-down* en el que la visión global de cómo los GRAFCET parciales se integran jerárquicamente entre ellos prevalece frente al enfoque *bottom-up*, que centra únicamente la atención en el GRAFCET parcial de producción. El capítulo se complementa con un ejemplo de bobinado de cable suministrado por la empresa Pirelli Cable y que pretende ilustrar cómo la guía GEMMA puede aplicarse en el sector industrial.

El capítulo 5 (*Estudio aplicado sobre estación trituradora-mezcladora*) es un caso práctico en el que, previa definición de las especificaciones, se aplica la metodología explicada en el capítulo 3 y se procede de forma iterativa a completar la guía GEMMA.

El capítulo 6 (*Conclusiones*) aborda los comentarios finales del libro, junto con algunas ideas de discusión para favorecer un debate de mejora de la utilización de la guía GEMMA.

El anexo A (*Diseño del panel de mando*) aporta aspectos complementarios obtenidos de otras áreas como la ergonomía, la interacción persona-máquina y la seguridad en máquinas, para la obtención de un panel de mando acorde con las especificaciones indicadas en la guía GEMMA. El panel de mando diseñado con los criterios aquí mencionados es el que se ha seguido a lo largo del libro.

El anexo B (*Representación alternativa de la guía GEMMA*) aporta una relectura efectuada por los autores de la representación gráfica convencional de la guía, de manera que, mediante la reorganización de los modos/estados, se facilite la comprensión de la guía.

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa Pirelli Cable, y en concreto al Sr. Joan Rovira, jefe de producción de la citada empresa, por ceder amablemente fotos y detalles de procesos de bobinado que han permitido ilustrar la guía GEMMA con un escenario industrial.

Los autores agradecen también a todos aquellos autores referenciados en la bibliografía su aporte continuado en un área como es la automatización industrial, en continuo cambio, pues de alguna manera han sido tomados como patrones en muchas páginas de este libro.

Pere Ponsa y Ramón Vilanova  
Octubre de 2005

## Índice

1 Fundamentos.....	11
1.1 Automatización .....	11
1.2 Supervisión .....	13
1.3 Necesidad de herramientas de representación y programación.....	17
2 GRAFCET .....	21
2.1 Introducción. Reseñas históricas.....	21
2.2 Elementos de GRAFCET y terminología.....	22
2.3 Receptividades. Notación.....	24
2.4 Reglas de evolución del GRAFCET .....	25
2.5 Estructuras básicas .....	25
2.5.1 Secuencia lineal.....	26
2.5.2 Convergencia y divergencia en “O” .....	26
2.5.3 Convergencia y divergencia en “Y” .....	27
2.6 Macroetapas .....	29
2.7 Ejemplo 1: Transporte y procesado de material.....	29
2.8 Ejemplo 2: Movimiento cíclico de un objeto .....	31
2.9 Ejemplo 3: Selección de cajas.....	32
2.10 Ejemplo 4: Automatización de una empaquetadora.....	34
3 Aspectos básicos de la guía GEMMA.....	37
3.1 Introducción .....	37
3.2 Metodología .....	39
3.3 Representación.....	43
3.3.1 Representación gráfica convencional .....	44
3.4 Utilización.....	51
3.4.1 Estudio de situaciones elementales.....	51
4 Diseño estructurado con la guía GEMMA.....	57
4.1 Forzado de GRAFCET.....	57
4.1.1 Reglas de jerarquía .....	57
4.1.2 Reglas de forzado .....	58
4.1.3 Representación del forzado .....	59
4.2 GRAFCET parcial de Seguridad.....	60
4.3 Conectividad de GRAFCET parciales .....	60
4.4 Estudio de caso práctico de posicionador de cable de un bobinador.....	64

5 Estudio aplicado sobre estación trituradora-mezcladora .....	73
5.1 Descripción del proceso .....	73
5.2 Especificaciones de Funcionamiento .....	76
5.3 Funcionamiento Automático y Ciclo a Ciclo .....	77
5.4 Parada en el estado actual .....	89
5.5 Detección de falta de producto.....	89
5.6 Consideración de una parada de Emergencia.....	92
6 Conclusiones.....	97
Anexo A. Diseño del panel de mando.....	99
Anexo B. Representación alternativa de la guía GEMMA.....	109
Bibliografía.....	113

## 1. Fundamentos

En este capítulo se detallan los conceptos básicos de automatización y supervisión, ya que, en opinión de los autores, ello permitirá centrar el contexto de los capítulos siguientes, destinados al desarrollo de la guía GEMMA.

### 1.1 Automatización

La Real Academia de las Ciencias Físicas y Exactas define la *automática* como el conjunto de métodos y procedimientos para la sustitución del operario en tareas físicas y mentales previamente programadas. De esta definición original se desprende la definición de la *automatización* como la aplicación de la *automática* al control de procesos industriales.

Por proceso, se entiende aquella parte del sistema en que, a partir de la entrada de material, energía e información, se genera una transformación sujeta a perturbaciones del entorno, que da lugar a la salida de material en forma de producto. Los procesos industriales se conocen como procesos continuos, procesos discretos y procesos *batch*. Los *procesos continuos* se caracterizan por la salida del proceso en forma de flujo continuo de material, como por ejemplo la purificación de agua o la generación de electricidad. Los *procesos discretos* contemplan la salida del proceso en forma de unidades o número finito de piezas, siendo el ejemplo más relevante la fabricación de automóviles. Finalmente, los *procesos batch* son aquellos en los que la salida del proceso se lleva a cabo en forma de cantidades o lotes de material, como por ejemplo la fabricación de productos farmacéuticos o la producción de cerveza.

En este punto es necesario hacer un breve inciso sobre los tipos de industria existentes y los problemas de control que se plantean en cada tipo de industria. Las industrias relacionadas con la automatización son básicamente la industria manufacturera y la industria de procesos. La industria manufacturera (*discrete parts manufacturing*) se caracteriza por la presencia de máquinas herramienta de control numérico por ordenador como núcleo de sistemas de fabricación flexible. En esta industria, destaca el uso de estaciones robotizadas en tareas de soldadura al arco o por puntos, pintura, montaje, etc., de forma que en la actualidad la necesidad de automatización es elevada si se desea ofrecer productos de calidad en un entorno competitivo. Uno de los temas principales a resolver en este tipo de industria es la planificación y gestión de la producción: asignación de tareas a máquinas, diseño del *layout* de la planta, sistemas flexibles que fabriquen diversos productos, políticas de planificación cercanas a la optimización, etc. En cuanto a la industria de procesos (*continuous manufacturing*), existen fábricas de productos de naturaleza más o menos continua, como la industria petroquímica, cementera, de la alimentación, farmacéutica, etc. Dentro del proceso de fabricación de estas industrias, se investiga en nuevas tecnologías, para la obtención de nuevos catalizadores, bioprocesos, membranas para la separación de productos, microrreactores, etc. En este tipo de industria, destacan la aplicación de algoritmos de control avanzado, - como, por ejemplo, el control predictivo -, o la formación experta de operarios de salas de control mediante simuladores. Respecto a las necesidades de automatización, la

industria de procesos tiene un nivel consolidado en cuanto a salas de control con sistemas de control distribuido (DCS), y el uso de autómatas programables para tareas secuenciales o para configurar sistemas redundantes seguros ante fallos, entre otros elementos.

No hay que olvidar que las industrias -tanto la manufacturera como la de procesos- realizan grandes esfuerzos en la optimización del proceso. Algunas de ellas se centran en el aspecto de la calidad, mientras que otras se centran en el aspecto de los costes. Estos factores -mejora de la calidad del producto y disminución de costes en la producción- son los condicionantes fundamentales en estas industrias, y en este sentido la automatización industrial contribuye decisivamente desde que a finales de la década de los años setenta apareció el microprocesador, núcleo de los controladores comerciales presentes en el mercado como los autómatas programables, los controles numéricos y los armarios de control de robots manipuladores industriales.

En cuanto a la expresión *control de procesos industriales*, ésta abarca, desde un punto de vista académico, la teoría de control básica de realimentación y acción PID, la instrumentación de control (sensores, actuadores, dispositivos electrónicos, etc.), la aplicación a procesos industriales (como, por ejemplo, la mezcla de componentes en un reactor químico), las diversas arquitecturas de control (centralizado, distribuido), las estructuras de control (*feedback*, *feedforward*, *cascada*, etc.) y la teoría de control avanzada (control predictivo, control multivariable, etc.), por citar algunos de los aspectos más relevantes.

Ciñéndonos a los algoritmos de control presentes en las industrias citadas, cabe destacar el control secuencial y la regulación continua. El control secuencial propone estados (operaciones a realizar para la transformación de la materia prima en producto) y transiciones (información relativa a sensores o elementos lógicos como temporizadores o contadores) en una secuencia ordenada que identifica la evolución dinámica del proceso controlado. En la regulación continua, mediante la estructura de control clásica *feedback*, se aborda la acción de control proporcional, derivativa o integral, respecto al error (diferencia entre la consigna y la medida de la variable de salida del proceso) para conseguir así una regulación adecuada de la variable (temperatura, caudal, nivel, etc.).

Respecto a instrumentación de control, los tres elementos básicos capaces de llevar a cabo el control secuencial o la regulación continua dentro del control de procesos industriales son el llamado autómata programable PLC, el ordenador industrial y los reguladores industriales (tanto en versión analógica como digital). Estos tres elementos comparten protagonismo y es frecuente encontrar artículos de opinión donde se comenta el futuro de la utilización de los PLC ante las continuas mejoras del control realizado mediante ordenador. Disputas aparte, cada uno de estos elementos halla su aplicación en la industria actual, y es por ello que la tendencia en los próximos años sea la de continuar utilizando estos elementos.

Durante los casi ya treinta años de utilización de autómatas programables en la industria, conviene destacar su labor eficaz en el control secuencial de procesos. Una de las aplicaciones de mayor éxito es la combinación de autómata programable con la tecnología electroneumática. Esta combinación ha permitido ofrecer soluciones de automatización basadas en el posicionamiento, la orientación y el transporte de material dentro de la planta, y es de gran ayuda en las tareas realizadas por otros elementos, como por ejemplo el robot manipulador industrial.

Los reguladores industriales son dispositivos generados de forma clara para la regulación continua de variables. Durante años, el regulador analógico tradicional ha sido el elemento capaz de controlar procesos en los que se requiere el control de temperatura, el control de caudal, o el control de presión, todos ellos ejemplos típicos de la ingeniería química. Con los avances en la electrónica digital y la informática industrial, los reguladores han pasado a ser controladores digitales autónomos, polivalentes desde el punto de vista de que se adaptan a un rango de tensiones y corrientes habituales

en la automatización industrial, por lo que un mismo controlador está condicionado para la regulación de diversas variables. Además, hoy en día disponen de bloques lógicos de programación de forma que también pueden hacer frente al manejo de sistemas secuenciales. Una arquitectura abierta de estos controladores facilita la implementación de estructuras de control tipo cascada, o arquitectura de control distribuida mediante un bus de campo orientado al control de procesos, como por ejemplo el bus MODBUS.

El ordenador aparece en el control de procesos industriales a mediados de la década de los años cincuenta en la forma de control centralizado, una arquitectura en desuso hoy en día. Ya entonces el ordenador disponía de unas funciones, que siguen estando muy presentes en las industrias actuales: monitorización, vigilancia, control y supervisión.

El ordenador es tan polivalente que puede utilizarse por sí mismo como elemento regulador de procesos sencillos, como por ejemplo mediante tarjeta de adquisición de datos AD/DA, y con el software adecuado, se pueden regular la temperatura y el nivel de un tanque en el que fluye un cierto caudal de agua entrante y saliente.

Por otra parte, mediante la utilización del puerto de comunicaciones RS-232C, el ordenador puede conectarse físicamente al autómatas programable, al controlador digital autónomo, o al armario de control de un robot manipulador industrial, y así ampliar las posibilidades de interacción entre estos elementos.

Finalmente, y gracias al desarrollo de las comunicaciones industriales, el ordenador puede formar parte de redes de ordenadores jerarquizados mediante la utilización de un bus de bajo nivel (bus AS-i), un bus de campo (PROFIBUS, CAN, por ejemplo) o una red de área local (Ethernet industrial).

Para finalizar este apartado, conviene destacar que la automatización contribuye al control automático del proceso y a relevar de esta tarea al operario, si consideramos que lo que interesa es la sustitución de la persona por un ente automático.

En los complejos procesos industriales, se ha puesto de manifiesto la necesidad de cambiar del control automático al control manual por necesidades de reajustes en el algoritmo de control o ante anomalías en el proceso, de forma que la automatización está contribuyendo, en un sistema de control abierto, a la intervención del operario, por lo que en estos casos no se trata tanto de sustitución sino de cooperación entre el operario y el controlador.

## 1.2 Supervisión

Los reguladores industriales básicos disponen de un *display* muy sencillo donde aparece, en forma digital numérica o mediante iconos de barras verticales, el valor cuantitativo o cualitativo de la consigna y el valor de la variable de salida dentro de una regulación continua. En este sentido, la información que se ofrece al operario es breve y concisa.

Por su parte, los autómatas programables se complementan con periféricos denominados genéricamente *interfaces hombre-máquina* HMI y que pueden ser desde sencillos *displays* con teclado numérico, hasta terminales táctiles con elementos de programación gráfica.

El operario procede a manipular el valor de los parámetros (temporizadores, contadores) directamente sobre el terminal, de forma que no tiene que editar el programa del autómatas cada vez que desea hacer cambios en el programa básico.

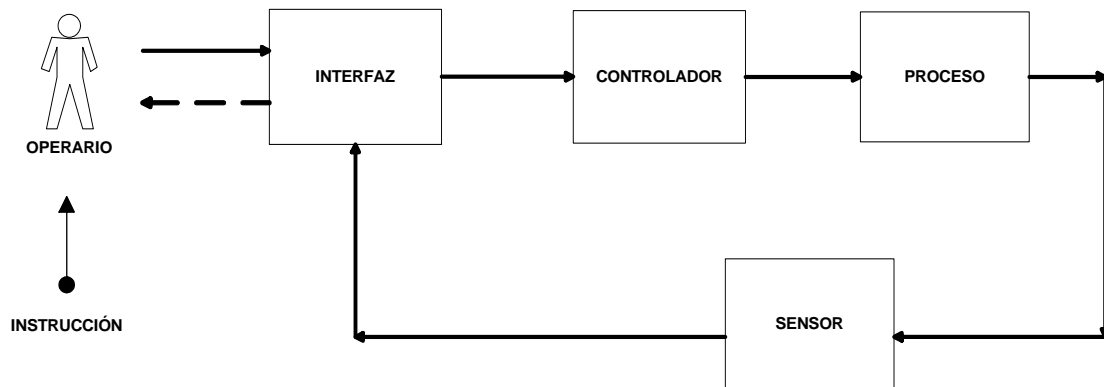


Fig. 1.1 Interacción del operario con el proceso controlado

Tanto en el caso del regulador como en el del autómatas, el operario interactúa con el proceso controlado y puede ejercer tareas rutinarias de vigilancia sin intervención, tareas de inicio o paro del ciclo, o interrupciones para modificar los parámetros del algoritmo de control, por citar algunas actividades, de manera que si se considera el operario como parte integrante del sistema se obtiene una cooperación entre operario y proceso regulado por el controlador. No se trata, pues, de una arquitectura totalmente automatizada; más bien es una arquitectura híbrida de interacción entre el operario humano, la interfaz y el controlador. En el manejo del ordenador en el control de procesos, la interacción entre operario y ordenador se amplía enormemente al poder manejar bases de datos, entornos de programación de alto nivel y conectividad con otros ordenadores en un entorno de control distribuido. Resulta singular destacar que desde el ordenador no sólo se pueden modificar los parámetros del algoritmo de control, sino que se pueden diseñar simulaciones del proceso con mayor o menor realismo respecto al proceso industrial. Así pues, desde el ordenador el operario tiene una mejor comprensión del proceso controlado mediante herramientas de programación orientadas a los procesos industriales, mediante las cuales se pueden generar aplicaciones a medida del proceso a estudio.

Una vez establecidos de forma clara el rol de la automatización y el tipo de interacción entre el elemento de control y el operario, conviene definir el concepto de supervisión. Una posible definición de supervisión de un proceso indica el conjunto de acciones desempeñadas con el propósito de asegurar el funcionamiento correcto del proceso incluso en situaciones anómalas.

Cuando en este contexto se habla de funcionamiento correcto frente a anómalo se entiende que el funcionamiento correcto es el que se produce mediante un algoritmo de control testeado por un operario experto y verificado de forma periódica/cíclica hasta obtener los resultados deseados de calidad del producto y satisfacción del control efectuado. En el entorno industrial, y ante la presencia de perturbaciones, el proceso controlado puede desviarse de la consigna fijada a priori, de forma que se produce un deterioramiento del funcionamiento correcto. De forma rápida, observamos, pues, que la supervisión engloba la automatización, el seguimiento y la vigilancia del proceso controlado. En el contexto que presentamos en estas líneas, entendemos que la automatización y la supervisión son fases consecutivas a aplicar sobre el proceso. De forma básica, el sistema de supervisión es el encargado de llevar a cabo las actividades siguientes:

- Adquisición y almacenamiento de datos
- Monitorización o vigilancia (*surveillance*) de las variables del proceso
- Control supervisor (*supervisory control*) sobre autómatas y reguladores industriales

- Detección de fallos
- Diagnóstico de fallos
- Reconfiguración

Cada una de estas funcionalidades requiere una explicación con más detalle.

La adquisición de datos se refiere básicamente a la conexión física de los sensores presentes en el proceso con el equipo de control mediante la adaptación electrónica pertinente. En el caso de los reguladores y autómatas, estos equipos disponen de una sección electrónica de entradas adecuada a la conectividad con sensores mediante un rango estándar de tensiones y corrientes. El ordenador utiliza la tarjeta AD / DA para esta función. El almacenamiento de datos es indispensable para el suministro de información de la evolución de las variables al supervisor del proceso. Atendiendo al gran volumen de información presente en las industrias manufactureras y de procesos, resultan necesarios el registro diario de tales variables, su almacenamiento ordenado y la posibilidad de extraer información precisa de toda la información en bruto. Actualmente, las técnicas de prospección de datos (*data mining*) ayudan a seleccionar la información relevante de un gran volumen de datos.

Desde el ordenador, se diseña el aplicativo de supervisión adecuado al tipo de proceso. Una de las funciones de este aplicativo es la representación gráfica de algunos elementos del proceso como reactores, válvulas, tuberías, etc., y cabe destacar los indicadores informativos de alarma, aquellos iconos que tienen un funcionamiento binario (encendido/apagado u ON/OFF), los objetos que representan una cierta dinámica (como el llenado o vaciado de líquido en un tanque) o la representación de gráficos históricos de las variables más relevantes. A este conjunto de objetos gráficos que permiten formar una representación dinámica del proceso controlado en la pantalla del ordenador se le denomina *monitorización*. La monitorización del proceso es uno de los factores clave en la supervisión ya que en ella radica la posibilidad de distinguir entre el funcionamiento correcto o anómalo del proceso mediante la ayuda de alarmas o indicadores de situaciones de riesgo. En este sentido, la monitorización se utiliza para la vigilancia de la evolución adecuada de las variables.

En el contexto industrial, existen los sistemas llamados SCADA (*supervisory control and data acquisition*), con los que es posible confeccionar la monitorización del proceso atendiendo a cada caso industrial en particular. La función de monitorización no es exclusiva del entorno industrial, pues uno de los dominios más relevantes es la medicina hospitalaria. En el ámbito de la instrumentación de equipos para su utilización en los cuidados intensivos de pacientes en hospitales, destacan los equipos de monitorización adecuados para el seguimiento de las constantes vitales de un paciente (monitorización hemodinámica, monitorización cardiaca, monitorización EEG), preparados para ofrecer alarmas acústicas o visuales para informar fielmente al equipo médico de posibles anomalías (por ejemplo, en el caso de la monitorización cardiaca, se llegan a contemplar hasta 12 derivaciones y análisis de arritmias).

Por *control supervisor (supervisory control)* se entiende la actividad que se lleva a cabo sobre un conjunto de controladores (autómata programable, regulador industrial) para asegurar que sus objetivos de control se cumplen. Dentro del aplicativo de supervisión, es habitual que exista un apartado donde se configura el tipo de comunicación con el controlador, la gestión de los controladores en caso de que exista una red física de controladores conectados, la captura de datos periódica del controlador y la presentación selectiva de algunas variables o cambios de las mismas en pantalla dentro de la monitorización.

Las actividades de detección, diagnóstico de fallos y de reconfiguración se agrupan dentro de las actividades que cumplen los sistemas de control tolerantes a fallos. Estos sistemas se caracterizan según si permiten acomodar un fallo con o sin degradamiento de prestaciones, pero sin desembocar en

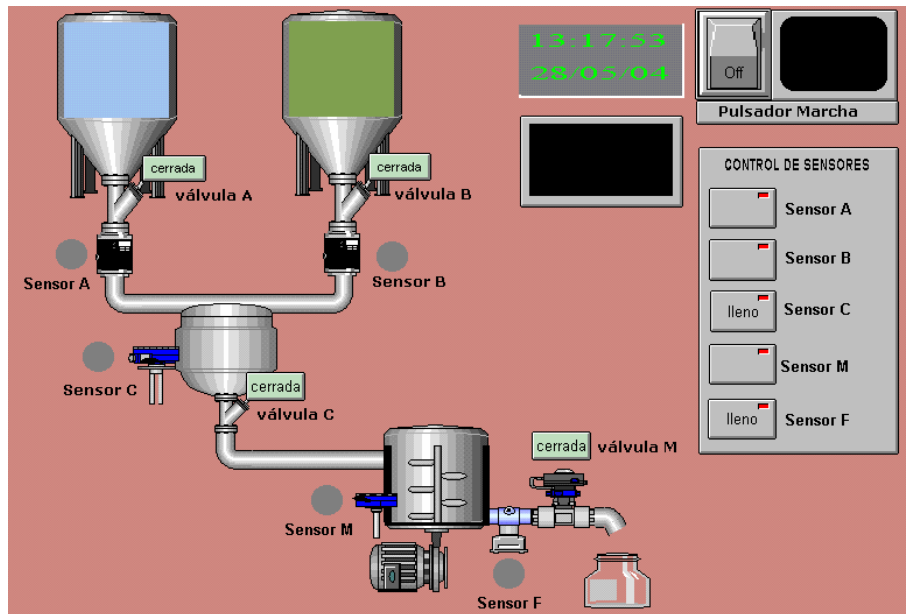


Fig. 1.2 Aplicativo de supervisión de una planta de mezcla mediante el SCADA All-Done (Freixas y Ros)

una avería interna. Sobre este punto existe abundante literatura acerca de los sistemas tolerantes a fallos en el ámbito académico, y hoy en día se estudian metodologías de diseño de sistemas de control tolerante a fallos en los cuales la supervisión forma parte de la arquitectura propuesta. A escala industrial, los llamados sistemas SCADA incluyen actualmente las fases de adquisición, monitorización y control supervisor, y uno de los grandes retos para los próximos años es potenciar en el diseño del aplicativo de supervisión, las funciones de detección, diagnóstico y reconfiguración con la finalidad de garantizar la seguridad en el manejo de los procesos industriales.

Cuando se utiliza el concepto de detección de fallos, se pretende determinar la presencia de fallos en el sistema, es decir, aquellas desviaciones no permitidas, debidas, por ejemplo al malfuncionamiento de sensores, válvulas y actuadores.

El diagnóstico pretende la determinación del tipo, el tamaño, la localización y el instante de aparición del fallo. Incluye la detección, el aislamiento y la estimación del fallo. Existen técnicas cuantitativas y cualitativas para realizar el diagnóstico pero ya se aprecia que es una tarea ardua, sobre todo en el caso de complejos sistemas, como por ejemplo la supervisión de turbinas, en las que la aparición simultánea de alarmas en pantalla ante fallos en elementos físicos dificulta efectuar el análisis de las causas y averiguar en qué orden se producen.

Finalmente, la reconfiguración significa un cambio en las entradas y/o salidas del controlador a través de un cambio en la estructura del controlador y sus parámetros.

Como vemos, en todas estas actividades que se llevan a cabo en la supervisión de un proceso, se pretende su automatización con el fin de generar herramientas de ayuda a la decisión. En este sentido, hoy en día existen múltiples posibilidades como las arquitecturas en las que la supervisión es humana, es decir llevada a cabo por un supervisor, o bien las arquitecturas automatizadas, llevadas a cabo por un supervisor experto artificial. En ambos tipos de arquitecturas, no se puede olvidar que el gran objetivo es evitar pérdidas económicas debidas al malfuncionamiento de la planta, y evitar el daño físico tanto para operarios como para las máquinas que intervienen. En este sentido, la automatización

y la supervisión se complementan con otras áreas del conocimiento como el mantenimiento y la seguridad industrial. No podemos dejar de citar el caso de estudio de la sala de control en planta nuclear, objeto de investigaciones llevadas a cabo durante años, con el fin de salvaguardar el buen funcionamiento de este tipo de plantas en las que ante un fallo humano o el fallo de algún componente, las consecuencias son desastrosas.

### 1.3 Necesidad de herramientas de representación y programación

Existe una tradición consolidada en el desarrollo de herramientas de programación en automatización y supervisión de procesos industriales. Veamos algunos ejemplos significativos:

- Gráficos de función secuenciales (SFC). Esta herramienta permite la representación del control secuencial y hoy en día es utilizada para procesos discretos y procesos *batch*. Una de las versiones más populares en Europa se conoce con el nombre de GRAFCET y es muy utilizada actualmente en automatización.
- Gráficos de función continuos (CFC). Esta herramienta permite la representación de la regulación continua de variables. Es característica la construcción de bloques modulares que pueden conectarse mediante la lógica básica (funciones AND, OR, NAND). Los bloques están elaborados para ser utilizados rápidamente, por ejemplo utilizando un bloque PID predefinido, aunque mediante una sintaxis derivada de los lenguajes estructurados como PASCAL permite crear bloques propios al usuario.
- Lenguajes de programación de controladores. En el caso de autómatas programables, los más usados hoy en día son el esquema de contactos o LADDER y el lenguaje mnemónico derivado del lenguaje ensamblador. En el caso de los reguladores industriales, la programación se realiza mediante la selección y configuración de un listado de instrucciones propias que permiten identificar la consigna SP, o el valor de los parámetros del PID, aunque hoy en día están ganando terreno los lenguajes basados en bloques funcionales, en alusión a la herramienta de la casa Addlink denominada SIMULINK
- SCADA. En este caso las siglas hacen referencia a la parte de software del sistema SCADA que permite la generación del aplicativo y la configuración de controladores comerciales, entre otras tareas. Existe gran diversidad de productos en el mercado, y la mayoría están orientados al uso en la industria de procesos, aunque poco a poco van apareciendo librerías de objetos adecuadas para la industria manufacturera (es el caso de Lookout de Nacional Instruments, que incorpora objetos como robots, máquinas herramienta o sistemas de transporte).
- Lenguaje de programación estructurado. Ante las exigencias presentes en la norma internacional IEC 1131-3, se recomienda en el apartado 3, referido a los lenguajes de programación en automatización, la necesidad de incorporar un lenguaje de programación de alto nivel para la programación de autómatas programables. Dicho lenguaje pretende ser una mejora de los lenguajes convencionales de autómatas; en todo caso, el usuario puede escoger hoy en día el tipo de programación básico o avanzado.
- Configurador de dispositivos de campo. Ante la implantación de sistemas de control distribuido mediante la utilización de buses de campo (MODBUS para la industria de procesos, PROFIBUS o DEVICE NET para la industria manufacturera, por ejemplo), es necesaria la conexión física de controladores y su posterior configuración mediante una

herramienta de software que permita rápidamente el acceso al nodo de la red y el acceso a la información de cualquiera de los controladores de la red.

Observando el abanico de herramientas y tras los comentarios realizados en los apartados anteriores, sería interesante desarrollar herramientas para la detección y el diagnóstico de fallos, y la reconfiguración de controladores. Para ello, hay que facilitar la transición entre supervisión y automatización y saber discernir en todo momento cuál es el mejor nivel de toma de decisiones ante problemas en el funcionamiento del proceso. Una vez dentro del nivel de automatización, hay que facilitar el cambio de control automático a control manual, en aquellas situaciones en las que el operario de planta puede reconducir el funcionamiento a una situación estable.

En las siguientes líneas, presentamos dos casos prácticos que ilustran la necesidad de incorporar elementos de diagnóstico y reconfiguración dentro de herramientas de programación. Tan sólo es una aproximación al problema, pero puede servir para sentar las bases de capítulos posteriores del libro.

#### CASO 1

Contexto: En sistemas automatizados, es útil la aplicación de tareas de mantenimiento ante la posibilidad de desgaste de componentes, falta de material de aprovisionamiento o cambio en el tipo de producto, por ejemplo.

Problema: Fallos en dispositivos; mantenimiento de los equipos.

Solución: Estructura de control en la que el operario pueda participar dentro del control secuencial. Una vez resueltos los problemas, el operario sitúa de nuevo el funcionamiento en modo automático.

#### CASO 2

Contexto: En sistemas automatizados, hay que estar pendientes de los indicadores de alarma (objetos gráficos en la pantalla del ordenador, balizas señalizadoras en la planta, señales acústicas, etc.). En algunas situaciones extremas de emergencia en previsión de posibles daños, hay que incluir la posibilidad de paro de las actividades.

Problema: Seguridad del funcionamiento del proceso controlado.

Solución: Estructura de control en la que el operario pueda detener el funcionamiento del proceso o subproceso, y parar momentáneamente el algoritmo de control. Una vez resueltos los problemas, el operario reconduce el funcionamiento en modo automático.

Ante la magnitud del problema, existen diversos grados de dificultad. Si el problema afecta localmente a un componente o a un subproceso, es factible bloquear el funcionamiento de la unidad sin el paro de toda la planta. Si el problema afecta a unidades que están conectadas secuencialmente, el problema puede ser más grave.

En sistemas industriales complejos, el paro general puede llevar a una reconfiguración difícil de llevar a cabo, en cuanto a seguir la producción allí donde se había aplazado, o restituir el sistema a las condiciones iniciales. Estas ideas parecen sugerir que se necesitan dos niveles de programación: el primer nivel correspondería al algoritmo de control en funcionamiento correcto, y el segundo nivel, al nivel de vigilancia del algoritmo anterior.

Esta suposición presenta el *handicap* de que los sistemas industriales presentan una dinámica compleja, con integración de muchos factores, y con el problema añadido de que es difícil prever las situaciones problemáticas de forma determinista.

Como aproximación al problema, disponemos de la guía GEMMA, que aporta una metodología que puede tratar algunos de los problemas planteados en supervisión y automatización. Hay que añadir que, si bien no incluye la detección de fallos, sí que apunta en la dirección al diagnóstico de fallos y a

la reconfiguración realizadas manualmente por el operario. Para concretar el marco de trabajo a desarrollar en capítulos posteriores de este libro, se detalla:

- Tipo de arquitectura de supervisión: supervisión humana
- Tipo de automatización: control secuencial
- Tipo de representación:
  - En supervisión: guía GEMMA
  - En automatización: GRAFCET

La supervisión humana indicada se caracterizará por la vigilancia del algoritmo de control en sus facetas:

- Puesta en marcha o paro del algoritmo de control
- Intervención en actividades semiautomáticas
- Diagnóstico y/o tratamiento de fallos

Todas estas facetas, o combinaciones de las mismas, se implementarán en función de la complejidad del problema.



## 2. GRAFCET

En este capítulo se introducirá el GRAFCET como metodología de automatización básica que servirá de base a partir de la cual plantear una automatización más completa mediante GEMMA. Por otra parte, la metodología GRAFCET es suficientemente importante en el mundo de la automatización de procesos por sí sola como para que merezca un tratamiento detallado y extenso.

### 2.1 Introducción. Reseñas históricas

Cuando nos hallamos ante la tarea de automatizar un proceso, nos encontramos con que la naturaleza de este proceso es, en la práctica totalidad de situaciones, secuencial. Una serie de actividades y operaciones a realizar conforme a una determinada secuencia, que determinan el proceso productivo en sí. A pesar de la elevada diversidad de tecnologías y dispositivos que puedan estar implicados en la realización de estas operaciones, desde el punto de vista de automatizar su operación, es esta ordenación secuencial lo que es importante. De esta forma, se tratará de tener claro, en cada caso, que es lo que determina que haya terminado una operación (en el fondo, una condición lógica), así como la actividad a realizar durante esta operación. De hecho, nos estamos refiriendo a un sistema secuencial, y la automatización de un sistema de este tipo la llevaremos a cabo mediante un automatismo que será una combinación de sistema secuencial y combinacional –secuencia de acciones/operaciones de control reguladas por expresiones lógicas.

A pesar de la existencia de métodos de diseño de sistemas lógicos (REF), la complejidad creciente de los automatismos industriales planteó, en la segunda mitad de los setenta la necesidad de definir de una manera clara las especificaciones funcionales de este tipo de sistemas -y unificar así la descripción de estos sistemas lógicos, sobre todo la parte secuencial-. De esta manera, surge en 1975, desde el grupo de trabajo *Logical Systems* de la Association Française de Cybernétique Economique et Technique (AFCET), un comité, formado tanto por miembros académicos como de la industria, para la estandarización de los requerimientos de representación para la automatización de sistemas lógicos. Después de analizar diferentes herramientas (entre ellas, *flowcharts*, Petri Nets, etc.), surge en 1977 la definición de GRAFCET (*Grphe Fonctionnel de Commande Etape-Transition*) como una nueva herramienta de modelado de este tipo de procesos. El resultado de este trabajo se recoge en un informe interno de la AFCET en agosto de 1977 y, por otro lado, como publicación oficial en *Automatique et Informatique Industrielle*, en diciembre de 1977. Esta fecha está considerada hoy en día como la fecha de nacimiento de GRAFCET.

Dos años más tarde, el 13 de diciembre de 1979, se plantean unas jornadas para el estudio del uso y la difusión de GRAFCET. Al mismo tiempo, se propone GRAFCET a la Agencia Nacional Francesa para la Estandarización (AFNOR). De esta forma, después de introducirse en el ámbito educativo y en vistas de la rápida evolución de los lenguajes de programación para permitir la implantación de GRAFCET en los controladores lógicos industriales, GRAFCET se convierte, en 1982, en estándar AFNOR con la referencia NF C03190.

A partir de este punto, GRAFCET se extiende con rapidez, tanto en el ámbito educativo como en el industrial, a escala internacional, hasta que en 1988 resulta reconocido por la IEC como estándar internacional bajo el nombre de Sequential Function Chart (SFC), con referencia IEC 848.

En la actualidad, algunos autómatas programables incorporan la posibilidad de introducir el grafo de GRAFCET o, en otros casos, se ofrece la posibilidad de trasladar el GRAFCET a código ejecutable. En cualquier caso, GRAFCET no se reconoce como un lenguaje de programación, y no debe confundirse con éste.

## 2.2 Elementos de GRAFCET y terminología

En definitiva, GRAFCET es un diagrama funcional en el que se describe el proceso a automatizar. Esta descripción considera que el proceso a automatizar y el autómata forman un único sistema. Se indican las diferentes acciones que hay que realizar sobre el proceso, así como la información a tener en cuenta para desencadenar, o obtener, estas acciones.

El GRAFCET se construye sobre la base de un conjunto de símbolos normalizados:

- **Etapas:** asociadas a las acciones a realizar sobre el proceso
- **Transiciones:** asociadas a las receptividades (en definitiva, información a partir de la cual se toman decisiones)
- **Líneas de evolución:** unen las etapas a las transiciones y las transiciones a las etapas. En GRAFCET, no se admite unir dos etapas o dos transiciones.

La *etapa* es el elemento básico mediante el cual el automatismo realiza acciones sobre el proceso. De esta forma, en una primera aproximación se puede dividir el proceso en macroetapas (tratadas más en detalle en un punto posterior), que posteriormente serán refinadas en operaciones más elementales. Al final, deben obtenerse acciones muy simples que queden determinadas por las entradas y salidas del sistema – podríamos decir que, entre ellas, existe una relación puramente combinacional.

Cada etapa se representa por un cuadrado, con un número en su interior a modo de etiqueta que la identifica. Aquellas etapas en las que se posiciona el sistema al arrancarse por primera vez se denominan *etapas iniciales* y se representan mediante un cuadrado con doble línea.

Una etapa puede estar activa o inactiva. En caso de que sea necesario determinar las etapas activas del GRAFCET en un instante determinado, éstas se identifican mediante un punto en la parte inferior del cuadrado.

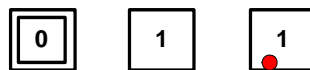


Fig. 2.1 Etapas GRAFCET

A las etapas podemos asignarles una o varias acciones a realizar mientras están activas. Estas acciones se describen en rectángulos unidos al símbolo de la etapa a que están asociadas. La descripción de estas acciones puede realizarse en dos niveles:

- **Nivel 1:** Se especifica la acción tan sólo desde el punto de vista funcional, sin ninguna referencia a la tecnología empleada para su implementación.

- **Nivel 2:** Se detallan aspectos operativos para la implementación de la acción. Generalmente, qué salida del autómatas hay que activar, o detener.

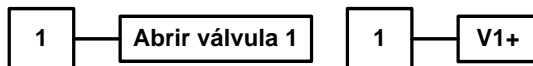


Fig. 2.2 Acciones asociadas a GRAFCET

En cualquier caso, conjuntamente con una descripción puramente simbólica de las acciones debemos tener una tabla en la que se asocie cada símbolo con la acción a realizar:

Tabla 1. Relación entre símbolo y descripción

Acción	Descripción
V1+	Abrir válvula 1

Las *transiciones* recogen las condiciones necesarias para que cese la actividad asociada a una etapa y pase a activarse la de la etapa siguiente. Gráficamente se representan por una línea perpendicular a la línea que une dos etapas. Puede darse también la posibilidad de que haya varias etapas conectadas a una sola transición. De esta forma, se dice que una transición está *validada* cuando todas las etapas unidas inmediatamente a esta transición están activas; en caso contrario, la transición está *no validada*.

De la misma forma que tenemos acciones asociadas a las etapas, tenemos *receptividades* asociadas a las transiciones. Estas receptividades son expresiones lógicas que evalúan como cierto o falso y en función de variables externas (entradas, sensores) y, posiblemente, internas (estados internos del automatismo, temporizadores, contadores, etc.) Esta receptividad se representa a la derecha del símbolo asociado a la transición y, al igual que las acciones, puede hacerse de forma literal o simbólica.

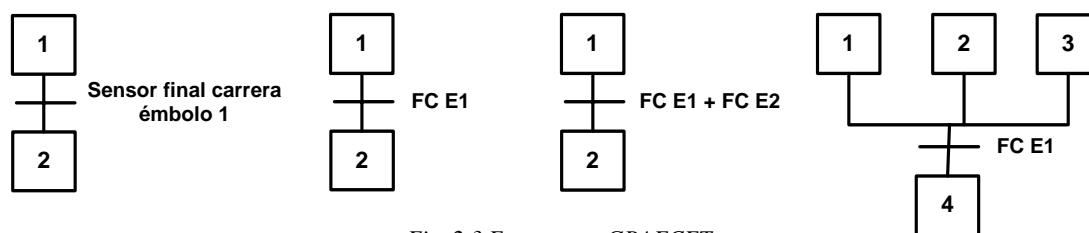


Fig. 2.3 Estructuras GRAFCET

Por supuesto, mediante las líneas de evolución podemos obtener estructuras de grafo con estructuras no necesariamente lineales.

Obsérvese que, por convención, las líneas de evolución van orientadas hacia abajo. En caso de que indiquen un retorno hacia arriba, lo indicaremos con la flecha correspondiente.

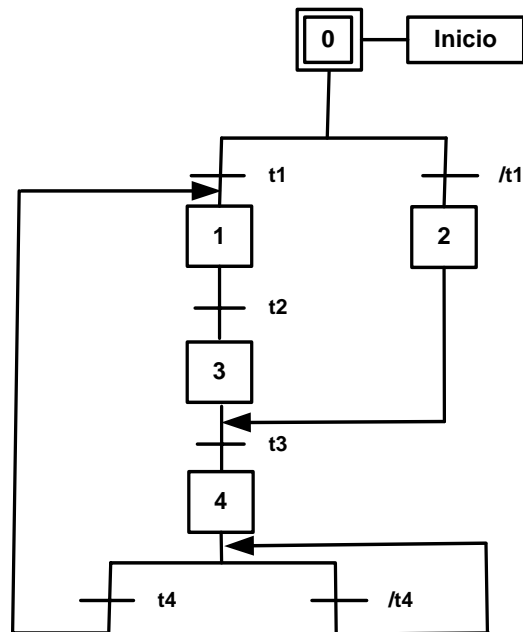


Fig. 2.4 Estructura GRAFCET

### 2.3 Receptividades. Notación

Tal como se ha visto, las receptividades asociadas a las transiciones constituyen una expresión lógica expresada en términos de variables ligadas al sistema que estamos controlando (ya sean directamente variables ligadas a sensores o a estados internos).

Como expresión lógica, expresaremos operaciones del tipo OR, AND y NOT sobre estas variables. Por tanto, es conveniente establecer la notación en base a la cual escribiremos estas expresiones.

Denotaremos una operación AND entre dos variables mediante el producto de ambas. Asimismo, la suma denotará una operación OR y la negación la indicaremos mediante una barra inclinada asociada a la variable que negamos.

Tabla 2. Relación entre expresión lógica y receptividad

Expresión lógica	Receptividad
$X1 \text{ OR } (X2 \text{ AND } X3)$	$X1 + X2 X3$
$X1 \text{ AND } (\text{NOT } X2)$	$X1 /X2$
$X1 \text{ OR NOT } (X2 \text{ AND } (X3 \text{ OR } X4))$	$X1 + /(X2 (X3 X4))$

## 2.4 Reglas de evolución del GRAFCET

Una vez disponemos del GRAFCET que representa la secuencia de acciones de nuestro proceso, veamos cuáles son las reglas de ejecución o evolución del mismo. Esto es, puesto que el hecho de que una etapa esté activa o no es lo que determina que se lleven a cabo las acciones asociadas a la misma, se debe establecer de manera clara qué etapa o etapas están activas en cada instante de tiempo. Las reglas de ejecución del GRAFCET nos determinan sobre la base de qué situación se activa/desactiva una etapa.

En el instante inicial, cuando arranca el automatismo, el GRAFCET se sitúa en la etapa inicial. Empezando con esta etapa como etapa activa, a partir de este instante seguiremos las reglas siguientes:

- **Franqueo de una transición:** La evolución del GRAFCET, franqueando una transición, tan sólo puede producirse cuando, de forma simultánea, la transición está validada y la receptividad asociada a la misma evalúa a cierto. Cuando estas situaciones se dan, la transición debe franquearse de forma obligatoria.
- **Evolución de etapas activas:** Cuando se franquea una transición, este hecho lleva asociada la desactivación automática de todas las etapas inmediatamente anteriores y la activación de todas las etapas inmediatamente posteriores.

En la figura siguiente se muestran posibles situaciones:

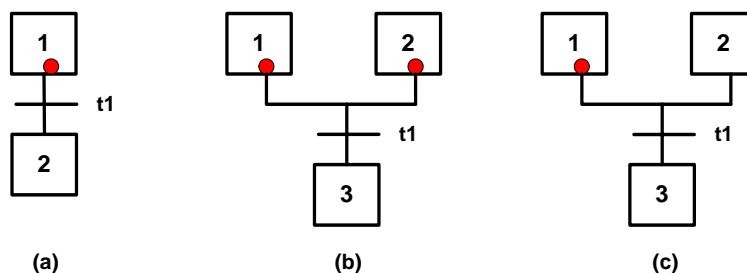


Fig. 2.5 Evolución de la etapa activa

- La etapa 1 está activa. La transición se franqueará si  $t1$  evalúa a cierto.
- Las etapas 1 y 2 están activas; por tanto,  $t1$  está validada. La transición se franqueará si  $t1$  evalúa a cierto.
- La transición no está validada puesto que no tiene todas las etapas inmediatamente anteriores activadas. La transición no se franquearía.

## 2.5 Estructuras básicas

A partir de los elementos presentados hasta el momento, obtenemos diagramas de flujo relativamente simples.

No obstante, hay muchos procesos que requieren construcciones más complejas, con iteraciones, decisiones, tareas en paralelo que deben sincronizarse, etc.

A continuación veremos las estructuras básicas de GRAFCET que, adecuadamente combinadas, nos permitirán obtener grafos de complejidad elevada.

- **Secuencia lineal.**
- **Convergencia y divergencia en “O”** para la representación de tareas alternativas.
- **Convergencia y divergencia en “Y”** para la representación de tareas simultáneas.

A continuación comntamos las construcciones anteriores, así como las particularidades que puedan presentar en su ejecución.

### 2.5.1 Secuencia lineal

Ésta es la estructura más simple posible y consiste en una serie de etapas, una detrás de otra. A cada etapa le sigue únicamente una transición y cada transición es validada únicamente por una etapa. Dentro de una secuencia lineal, tan sólo una etapa puede estar activa.

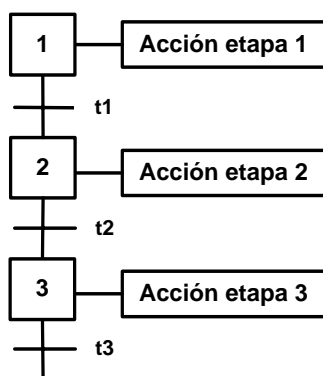


Fig. 2.6 Estructura lineal

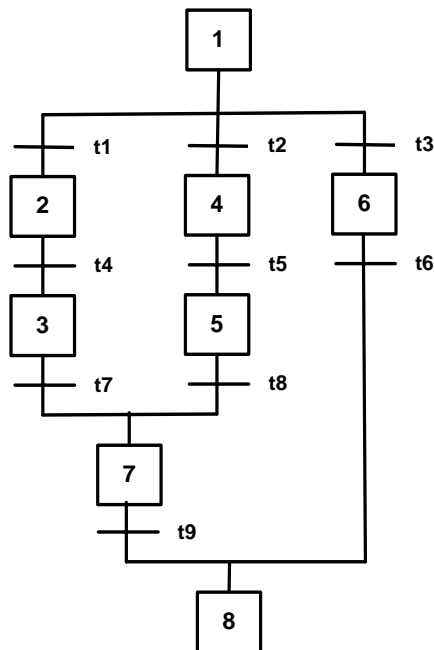
### 2.5.2 Convergencia y divergencia en “O”

Esta estructura está compuesta por tres partes: (I) una divergencia en “O” en la que, desde una etapa, se inician varios caminos posibles; (II) una serie de caminos alternativos, generalmente con una estructura lineal, y (III) una convergencia en “O” en la que los anteriores caminos alternativos vuelven a reunirse.

De hecho, no es necesario que haya una única convergencia. Como se muestra en la figura, pueden haber varias convergencias que vayan reuniendo las diferentes alternativas.

A partir del punto de divergencia, las diferentes transiciones que conducen a los diferentes caminos han de ser excluyentes, de forma que el proceso tan sólo pueda progresar por uno de ellos.

En caso de que no fuese ésta la situación, tendríamos varios procesos que podrían iniciarse y desarrollarse de manera simultánea, en paralelo. Si ésta es realmente la situación deseada, entonces deberíamos usar la estructura en “Y” que se comenta en el subapartado siguiente.



*Fig. 2.7 Estructura en "O"*

De esta forma, en la estructura GRAFCET de la figura podríamos tener las situaciones siguientes:

Partimos de la etapa 1 como etapa activa. A partir de aquí, el proceso puede evolucionar por tres vías distintas, según se cumpla  $t_1$ ,  $t_2$  o  $t_3$ . Tal como se ha comentado, las receptividades asociadas a estas transiciones deben ser tales que solamente una de ellas sea cierta.

La situación inversa la tendríamos a la llegada de las etapas 7 y 8. Así, llegaríamos a la etapa 7 en caso de que hubiésemos evolucionado a través de  $t_1$  o  $t_2$ . ¿Cómo podrá producirse la activación de la etapa 7? Pueden darse dos situaciones:

- Que estemos en la etapa 3 como activa y se verifique la transición  $t_7$ .
- Que estemos en la etapa 5 como activa y se verifique la transición  $t_8$ .

De la misma manera, la etapa 8 se activaría desde la etapa 7, o la 6 mediante la verificación de la transición  $t_9$  o  $t_6$ , respectivamente.

### 2.5.3 Convergencia y divergencia en "Y"

Al igual que en el caso anterior, esta estructura está compuesta por tres partes: (I) una divergencia en "Y" en la que, desde una etapa, varios caminos deben iniciarse de forma simultánea, (II) una serie de caminos, generalmente con una estructura lineal, y (III) una convergencia en "Y" en la que los anteriores caminos vuelven a reunirse. Tanto la convergencia como la divergencia en "Y" vienen representadas, gráficamente, por dos líneas paralelas.

La particularidad de esta estructura es que asociadas a los diferentes caminos tan sólo tenemos una transición de entrada (la de la etapa previa a la estructura en "Y" propiamente dicha) y varias transiciones de salida (tantas como caminos paralelos tengamos).

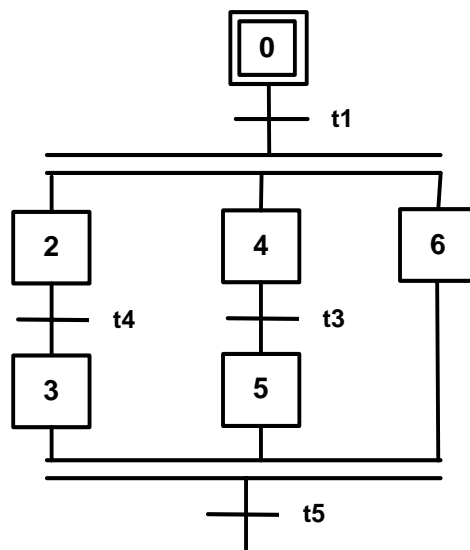


Fig. 2.8 Estructura en "Y"

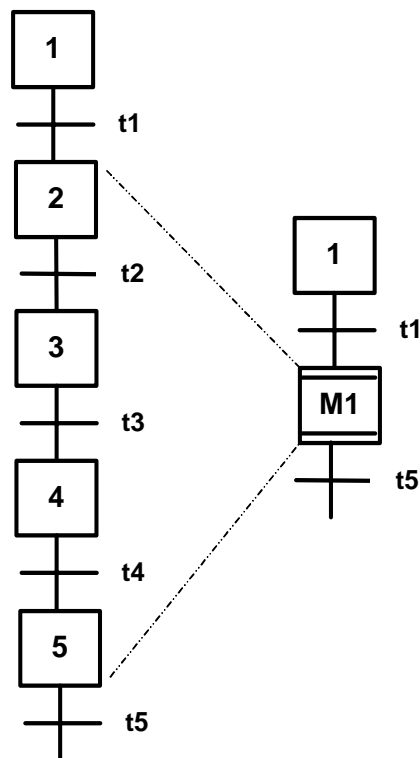


Fig. 2.9 Macroetapas

De esta manera, la evolución del GRAFCET en la etapa inmediatamente posterior a la convergencia en “Y” queda sujeta a que se hayan completado todos y cada uno de los caminos.

Mediante esta estructura, contemplamos la posibilidad de representar procesos que en nuestro sistema tienen lugar en paralelo. Asimismo, el mecanismo de convergencia en “Y” nos puede servir para tratar un recurso compartido por varios procesos.

En el diagrama de la figura, por ejemplo, desde la etapa 0, una vez activada la transición t1, según las reglas de evolución del GRAFCET, se desactivaría la etapa 0 y se activarían las etapas 2, 4 y 6. A partir de este punto, cada una de las tres evoluciones seguirá su curso hasta que, al llegar a la convergencia en “Y”, el franqueo de la transición t5 deberá esperar a que estén activas las etapas 3, 5 y 6.

Una vez en esta situación, las tres etapas se desactivan y franqueamos t5. Esta espera es representativa de una sincronización de tareas. Cada uno de los caminos podría representar, por ejemplo, una operación sobre una determinada pieza o componente, de manera que, hasta que no hayan terminado todas las operaciones, la pieza no puede evolucionar hasta la fase siguiente.

## 2.6 Macroetapas

Cuando aplicamos GRAFCET para plantear la automatización de un proceso determinado, y éste es de una determinada complejidad o envergadura, en un primer paso estableceremos las principales líneas de ejecución del mismo, sin entrar muy en detalle en muchos pasos concretos del proceso. A estas líneas generales de ejecución las llamamos *macroetapas*.

Las macroetapas representan, pues, tareas a realizar, y podemos pensarlas de modo equivalente a las macros que incorporan muchos lenguajes de programación.

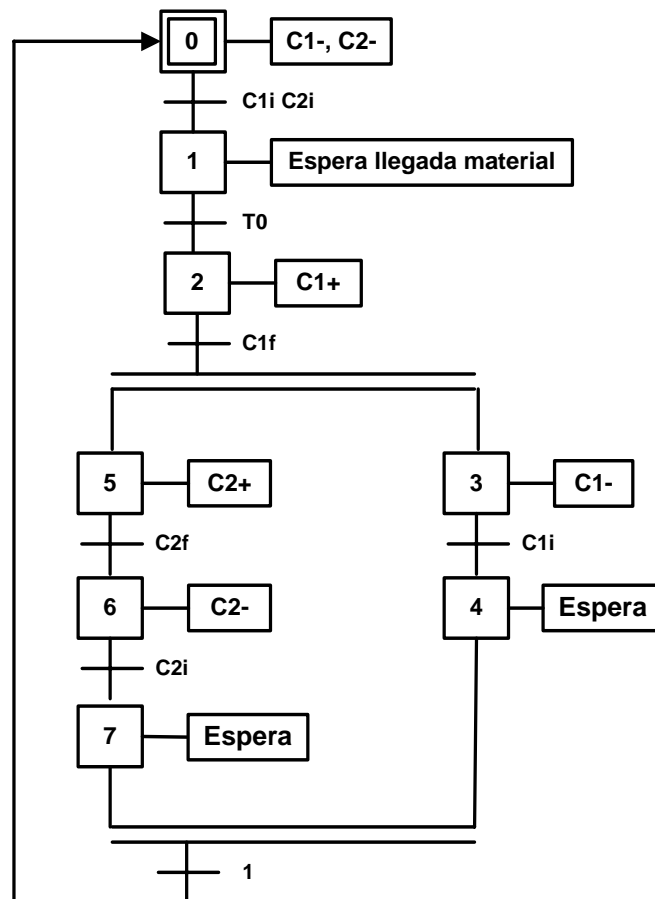
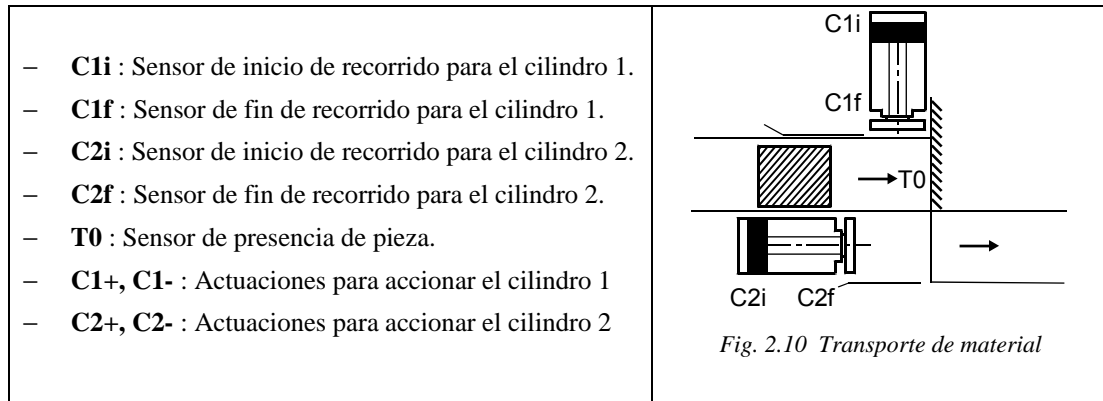
## 2.7 Ejemplo 1: Transporte y procesado de material

Una etapa presente en muchos procesos de manufactura es la del transporte de la pieza que estamos procesando a la siguiente estación de trabajo para continuar su procesado. El esquema del proceso se correspondería con el que se ilustra en la figura 11.

La pieza llega por la cinta 1 hasta ubicarse delante del cilindro neumático 1. Una vez en esta posición, la pieza es empujada y ubicada delante del cilindro neumático 2, el cual la sitúa sobre la cinta 2.

El ciclo puede volver a empezar una vez los dos cilindros neumáticos vuelven a estar en sus posiciones originales.

Cada cilindro lleva asociados dos sensores que permiten saber si el cilindro está en su posición inicial o final. Disponemos también de un sensor que nos informa de que ha llegado una pieza nueva para ser transportada a la cinta 2.



*Fig. 2.11 GRAFCET Ejemplo 1*

## 2.8 Ejemplo 2: Movimiento cíclico de un objeto

En este ejemplo, se utiliza el GRAFCET para describir un proceso genérico consistente en la ejecución del movimiento cíclico de un objeto. Este proceso genérico es aplicable a situaciones diversas (puente grúa, transporte automático guiado, etc.). El proceso consiste en un motor con doble sentido de giro, en cuyo eje tenemos conectado un tornillo sin fin. Conectado a este tornillo tenemos un objeto que realizará un movimiento hacia la derecha o bien hacia la izquierda, en función del sentido de giro del motor. Dos sensores de final de carrera nos delimitan el recorrido del objeto. De esta forma, un ciclo de movimiento consiste en que el objeto se mueva desde el origen hasta el final y vuelva a la posición de origen.

Para el accionamiento del sistema disponemos de los pulsadores siguientes:

- **M**: Puesta en marcha
- **P**: Parada. Si se pulsa en medio de un ciclo, el objeto debe finalizarlo y parar una vez completado el ciclo de movimiento.
- **E**: Parada de emergencia. En este caso, el proceso debe pararse inmediatamente y pasar a una posición de espera con el fin de que el operario solucione el posible problema. Una vez solucionado el problema, se debe reiniciar el proceso para que se pueda volver a iniciar de nuevo el movimiento cíclico.
- **R**: *Reset* del proceso. Con este pulsador hacemos que el proceso se sitúe en su posición original (es decir, el objeto a mover debe quedar ubicado en la posición inicial).

Y los sensores y actuadores de que disponemos son:

- **Mi**: Giro del motor para movimiento a la izquierda (avance del objeto).
- **Md**: Giro del motor para movimiento a la derecha (retroceso del objeto).
- **Fci**: Sensor de fin de carrera de inicio de recorrido.
- **Fcf**: Sensor de fin de carrera de fin de recorrido.

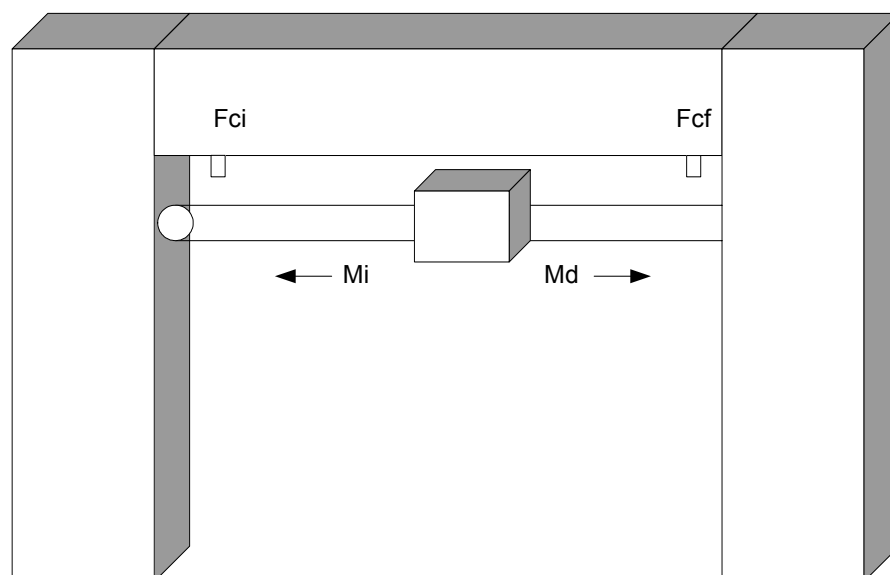


Fig. 2.12 Movimiento cíclico

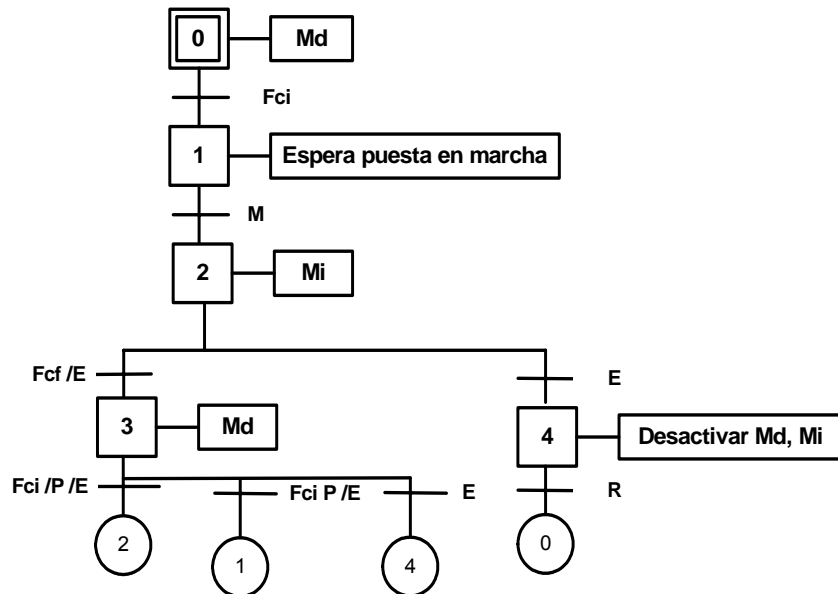


Fig. 2.13 GRAFCET movimiento cíclico

### 2.9 Ejemplo 3: Selección de cajas

En este ejemplo, vemos como extendemos la idea planteada en el ejemplo anterior para realizar la automatización de un proceso de selección de cajas. El esquema del proceso está indicado en la figura siguiente:

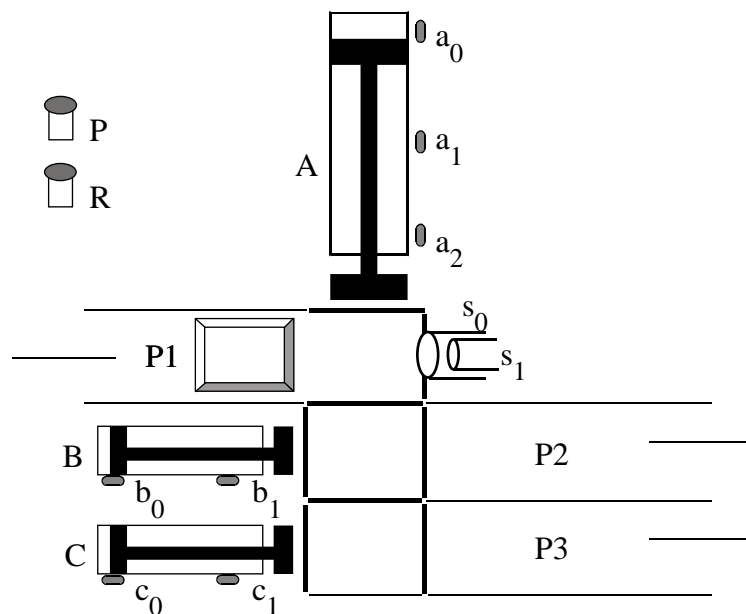


Fig. 2.14 Esquema del proceso de selección de cajas

Partimos de los cilindros A, B y C en reposo (situación determinada por la activación de los sensores  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$ ) y al pulsar un pulsador P se activan los motores de las plataformas (P1, P2, P3). El funcionamiento es el siguiente:

- Al detectarse una caja delante del cilindro A por la plataforma P1, mediante los sensores  $s_0$  y  $s_1$  conocemos si la caja es grande o pequeña (grande si  $s_1$  está activo; pequeña si  $s_0$  está activo). En este momento, paramos el motor de la plataforma P1.
- Si la caja es pequeña, hay que evacuarla por la plataforma P2, activando previamente el cilindro A hasta su primer final de carrera ( $a_1$ ), y después actuar sobre el cilindro B hasta su primer final de carrera ( $b_1$ ) para evacuar la caja. A continuación, ponemos los cilindros A y B en su posición de reposo y activaremos otra vez el motor de la plataforma P1.
- Si la caja es grande, hay que evacuarla por la plataforma P3, activando previamente el cilindro A hasta su segundo final de carrera ( $a_2$ ), y después actuar sobre el cilindro C hasta su primer final de carrera ( $c_1$ ) para evacuar la caja. A continuación, ponemos los cilindros A y C en su posición de reposo y activaremos otra vez el motor de la plataforma P1.
- Una vez evacuada la caja, el automatismo vuelve al inicio, donde espera detectar una nueva caja delante del cilindro A.

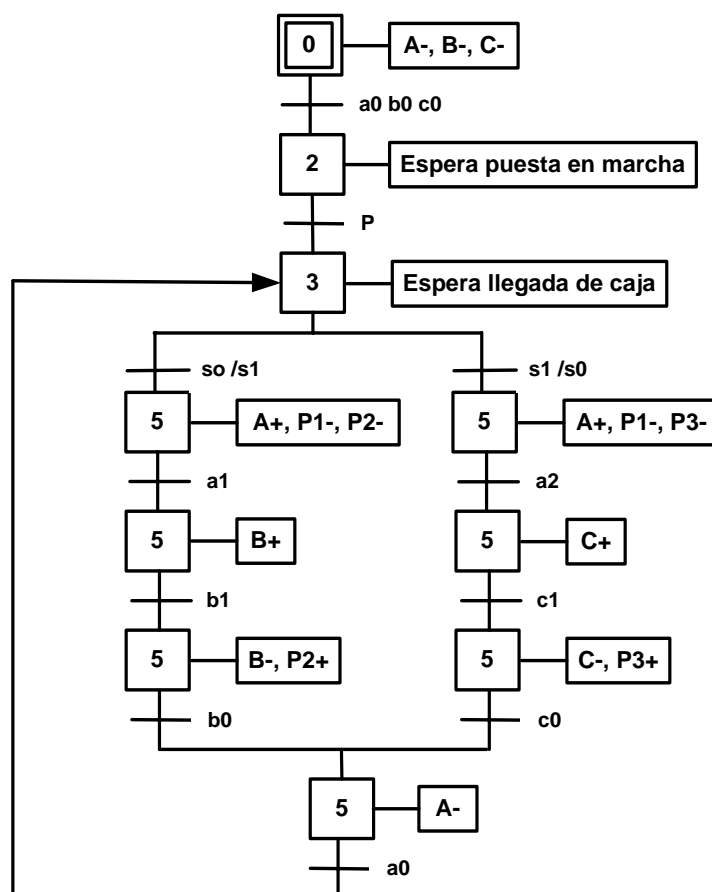


Fig. 2.15 GRAFCET para el proceso de selección de cajas

## 2.10 Ejemplo 4: Automatización de una empaquetadora

La máquina que se pretende automatizar realiza la agrupación de elementos por empaquetar y su introducción posterior en una caja. El operador se encargará de preparar la caja y situarla en la máquina. El resto de operaciones se realizan de manera automática.

Las figuras 2.16 y 2.17 muestran el detalle de la máquina empaquetadora. El proceso que realiza es el siguiente: El producto va llegando y se sitúa en línea, formando grupos de tres productos sobre el cilindro B. Mediante este cilindro, elevamos el grupo de tres productos a la altura del cilindro A.

Puesto que esto lo realizamos a través de una parte elástica que permite el ascenso pero no el descenso del producto, podemos retirar el cilindro B dejando el grupo de productos a la altura del cilindro A.

Una vez disponemos de un grupo de nueva productos (tres filas) situados delante del cilindro A, éste los ha de introducir dentro de la caja (nótese que el plato del cilindro B le sirve de guía para empujar el grupo de productos).

El pistón D mantiene la caja en posición horizontal, de manera que, una vez la caja se ha llenado (dos hileras de nueve productos), éste ha de liberar la caja y soltarla sobre la cinta transportadora.

Los sensores y actuadores disponibles son los siguientes:

- t1: Permite detectar un producto. Sirve para indicar que se ha formado una hilera de tres productos.
- t2: Permite detectar un producto. Sirve para indicar la formación de un grupo de nueve productos (tres filas de tres productos cada una).
- t3: Es un sensor de presión. Juntamente con a2 nos indica que la caja está llena.
- a2: Sensor que marca el fin de recorrido del cilindro A.
- a0: Sensor que marca el inicio de recorrido del cilindro A.
- b0: Sensor que marca el fin de recorrido del cilindro B.
- b1: Sensor que marca el inicio de recorrido del cilindro B.
- d1: Indica la posición del cilindro D (caja en posición horizontal).

Para los actuadores utilizamos el nombre del cilindro seguido, del signo '+' o '-', según proceda. Disponemos también de un pulsador M para poner en marcha la máquina.

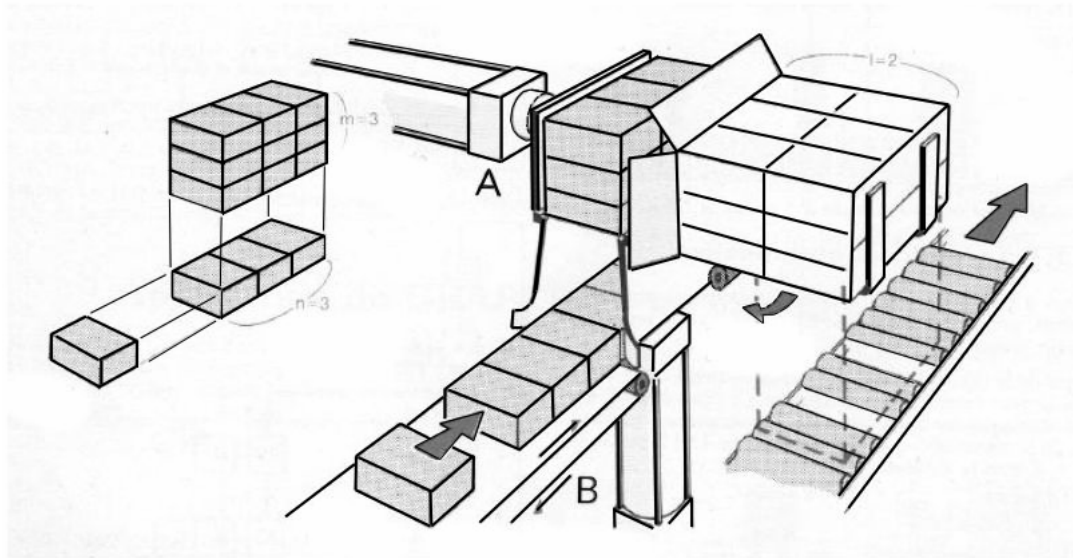


Fig. 2.16 Máquina empaquetadora

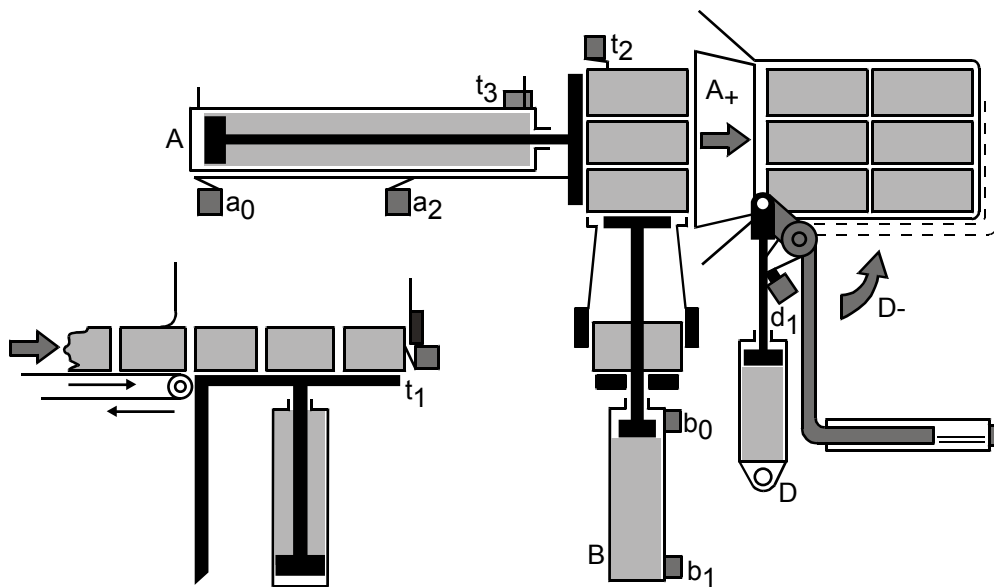


Fig. 2.17 Máquina empaquetadora. Detalle de la instrumentación

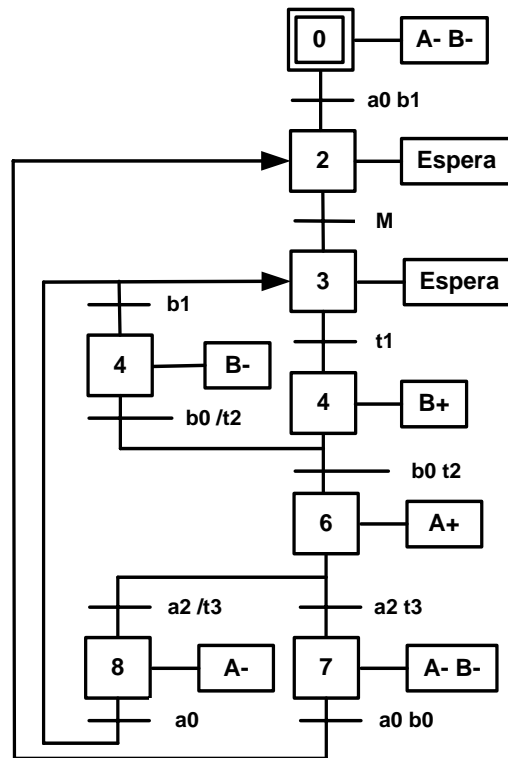


Fig. 2.18 GRAFCET para la máquina empaquetadora

### 3. Aspectos básicos de la guía GEMMA

En este capítulo, se detallan los conceptos básicos de la guía GEMMA asociados a la automatización de procesos complejos. La exposición se divide en una introducción, en la que se describe el marco del diseño estructurado de sistemas de automatización, seguida de la metodología, en la que se incluye la guía. A continuación, se procede a la representación gráfica estándar junto a la descripción de los estados que la forman. Finalmente, se escenifica la utilización de la guía mediante situaciones didácticas.

#### 3.1 Introducción

La guía GEMMA procede de los trabajos llevados a cabo durante dos años por la ADEPA (*Agence nationale pour le Développement de la Productique Appliquée à l'industrie*), agencia nacional francesa para el desarrollo de la producción aplicada a la industria. Las siglas GEMMA (*Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrets*) designan guía de estudio de los modos de marcha y paro. En el contexto de su creación, en 1993, se concibe para que esté en consonancia con las normas de seguridad de la Unión Europea. Bajo la norma nacional francesa UTE C 03-191, se complementa con la representación GRAFCET y pretende dar cabida a una metodología que incluya los modos de marcha y paro del control secuencial, el funcionamiento correcto del proceso controlado, junto con el funcionamiento deteriorado ante anomalías e incluso el tratamiento de situaciones de emergencia en previsión de posibles daños humanos o materiales.

La primera idea asociada a la guía GEMMA que conviene matizar es que se trata de un enfoque de diseño estructurado. Ante la complejidad de los factores que intervienen en la automatización de procesos, es conveniente utilizar el diseño estructurado con el fin de modelar, de forma parcial, las tareas. En el diseño estructurado de un sistema automatizado, aparecen tres módulos:

- Módulo de seguridad
- Módulo de modos de marcha
- Módulo de producción

La representación de la guía GEMMA tiene en cuenta la presencia de estos módulos, junto con las relaciones internas existentes entre módulos. La jerarquía ilustrada en la figura 3.1 pretende intensificar la atención en el aspecto de seguridad de los sistemas automatizados en entornos productivos, como por ejemplo en situaciones de emergencia, en situaciones de fallos de dispositivos, o en situaciones de producción defectuosa, de forma que, ante estas contingencias, el módulo de seguridad es prioritario respecto a los otros módulos.

En segundo lugar, es notoria la intervención del operario como parte integrante del sistema, pues aporta experiencia en el cambio de modo automático a modo manual cuando el funcionamiento del proceso lo requiere.

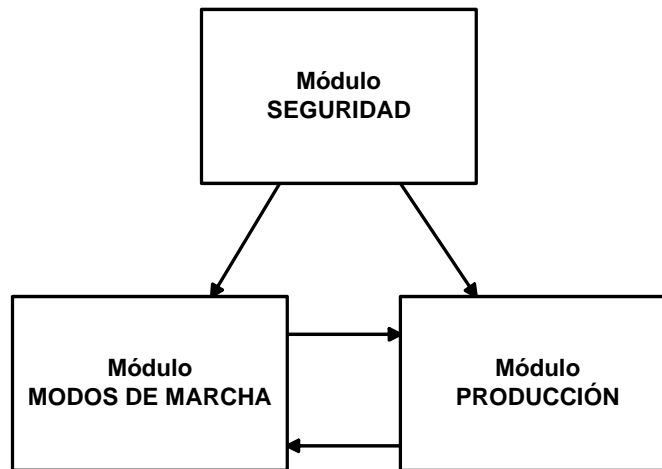


Fig. 3.1 Estructura modular del diseño estructurado de sistemas

Es decir, el control global del proceso puede ser debido a fragmentos de control intermitentes entre control automático y control manual. En tercer lugar, aparece el módulo de producción, que se entiende que está supeditado a los módulos precedentes, y en el que tenemos el funcionamiento de ejecución secuencial de activación y desactivación de estados mediante la lectura lógica de las transiciones.

Analizando estos módulos de forma inversa, la guía GEMMA pretende conservar la metodología de modelado GRAFCET pero teniendo en cuenta que en el diseño estructurado de un sistema automatizado coexisten diversos GRAFCET parciales, los cuales hay que relacionar y jerarquizar convenientemente.

Así, en el módulo de producción se concibe el organigrama de control básico en condiciones idóneas de funcionamiento, organigrama que se conoce como el GRAFCET de producción o GRAFCET de base; en el módulo de modos de marcha, el operario vigila el GRAFCET de producción y puede llegar a intervenir, si la situación lo requiere, mediante el cambio de control automático a manual (o viceversa, para reestablecer la situación) en este módulo, el organigrama se conoce como GRAFCET de conducción; finalmente, en el módulo de seguridad se procede al tratamiento de emergencias, fallos y defectos, con la posibilidad, por ejemplo, de que, se realice paradas de emergencias sobre el sistema, con las convenientes fases de solución de problemas y reconfiguración para volver a la condición de reinicio de la marcha y producción.

En este último módulo, el organigrama se conoce como GRAFCET de seguridad.

La representación de la guía GEMMA permite enlazar dichos modelos mediante la secuencialización de estados y transiciones. Internamente, ello se traduce en la utilización de las reglas de forzado y las reglas de evolución del GRAFCET, tal como se detallará en el capítulo siguiente.

Uno de los objetivos principales de la guía GEMMA es la utilización de una metodología sistemática y estructurada que ofrezca a los expertos en automatización información precisa del sistema en clave de estados posibles; de ahí que habitualmente se presente en el formato de la descripción completa de todos los posibles estados que puede llegar a tener el sistema.

Al ser la guía GEMMA una metodología que incorpora el módulo de seguridad, así como la vigilancia del operario sobre el módulo de producción se acerca a las características fundamentales presentes en

las referencias bibliográficas que tratan el tema de supervisión de procesos. Así pues, la relevancia de la guía GEMMA radica en que promueve claramente la integración entre dos áreas de conocimiento complementarias como la supervisión y la automatización.

### 3.2 Metodología

Atendiendo a los comentarios anteriores cabe ubicar la guía GEMMA en un marco metodológico genérico, ya que están implicados una serie de conceptos que habitualmente se tratan en las referencias bibliográficas de forma separada. El marco metodológico consta de las fases siguientes, que el operario debe realizar:

- Automatización
- Supervisión
- Interacción
- Implementación
- Pruebas

En el caso de llevar a la práctica un proyecto de automatización, es necesario seguir las fases de la metodología presentada, así como indicar el operario o grupo de ellos encargados de llevar a cabo las fases por separado o el conjunto de ellas. En todo caso, este marco metodológico genérico escapa a las pretensiones del libro, pero puede servir para especificar el contexto en el que la guía GEMMA debe desarrollarse.

La figura 3.2 ilustra la secuencia ordenada de fases. Es decir, si la metodología quiere llevarse a la práctica hay que seguir paso a paso el método de forma secuencial. Cabe destacar el rol del operario en este esquema. El operario lleva a cabo cada una de las fases; hace la transición entre una fase y la siguiente, y, finalmente, se encarga de proceder a una iteración para rehacer el primer ciclo para introducir mejoras.

Las fases que aparecen en el marco metodológico no son conceptos puntuales; cada uno de ellos puede tratarse en profundidad. A continuación, se presenta tan sólo un breve resumen de cada una de las fases, ya que lo que se quiere constatar es la relación entre las fases y los aspectos dinámicos intrínsecos de cada fase.

#### Automatización

En esta fase elemental hay que desarrollar los pasos siguientes relacionados con el GRAFCET y la puesta en marcha de automatismos:

- Observación del proceso a controlar y generación del GRAFCET de primer nivel en su descripción funcional.
- Selección del automatismo (autómata programable, regulador digital autónomo).
- Selección y cableado físico de sensores y actuadores, con las secciones de entradas y salidas del automatismo.
- Generación del GRAFCET de segundo nivel en su descripción tecnológica.

En estas líneas, la fase de automatización coincide con todas las propuestas que hacen las referencias bibliográficas básicas de automatización y autómatas programables. En la fase de automatización aparecen diversas tecnologías, entre ellas la sensórica y la neumática, supeditadas a su conexión física con el automatismo (autómata programable, por ejemplo).

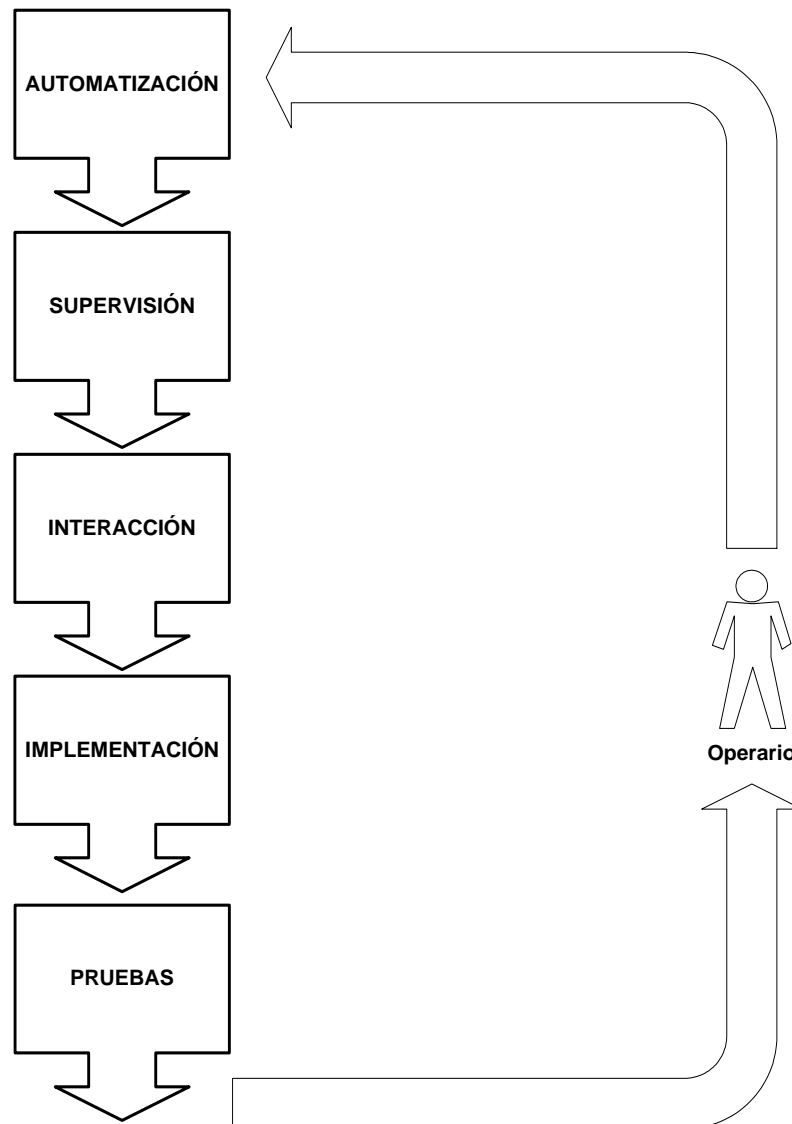


Fig. 3.2 Marco metodológico genérico

La representación del control secuencial sobre el proceso se representa mediante GRAFCET. A partir de estas líneas, el GRAFCET generado pasa a denominarse GRAFCET de producción, en asociación con el módulo de producción.

Una vez la fase de automatización ya está consolidada, hay que establecer la fase de supervisión.

## Supervisión

A continuación, en esta segunda fase, hay que desarrollar los pasos siguientes:

- Hay que reunir el máximo de especificaciones a priori sobre los estados posibles en las que se puede encontrar una máquina o un proceso, según la experiencia del agente encargado de la automatización o según las peticiones del cliente.
- Hay que definir los módulos a utilizar según la complejidad del problema (seguridad, modos de marcha, producción) y representar gráficamente el caso de estudio mediante los estados y las transiciones de la guía GEMMA.
- Para cada módulo, hay que generar un GRAFCET parcial. Cabe destacar que en el caso de producción, el GRAFCET de producción ya se ha generado en la fase de automatización, de manera que lo que hay que establecer aquí es la relación con el resto de módulos. En el caso del módulo de modos de marcha el GRAFCET de conducción promueve la activación y desactivación del módulo de producción, que normalmente presenta un desarrollo secuencial cíclico. Finalmente, mediante el módulo de seguridad, el GRAFCET de seguridad pertinente vigila los dos módulos anteriores ante la posible aparición de fallos o situaciones de emergencia en el sistema automatizado.
- Los GRAFCET parciales se integran de forma modular y estructurada en un solo GRAFCET general que contemple todos los módulos enunciados en función de la complejidad del problema, mediante las reglas de forzado y las reglas de evolución.
- El operario procede a la supervisión cuando está vigilando la evolución del proceso controlado automáticamente, y está atento a la presencia de posibles imprevistos que merezcan activar el módulo de seguridad e intervenir directamente en el mismo.

Una vez la fase de supervisión ya está consolidada, hay que establecer la fase de interacción.

## Interacción

En la interacción entre la supervisión humana llevada a cabo por el operario y el proceso controlado por parte del automatismo, hay que concretar la intervención del operario mediante el diseño del panel de mando en función de las acciones físicas sobre dispositivos y la recepción de señales informativas visuales o acústicas.

Los dispositivos concretos a utilizar dependen de los módulos definidos en la fase denominada *supervisión*. En cualquier caso, presentamos una disposición básica de dispositivos en el panel de la figura 3.3. Para el diseño del panel de mando se utilizan conceptos que aparecen en la normativa de seguridad en máquinas, así como especificaciones ergonómicas y el conjunto de situaciones a tratar mediante la guía GEMMA. El anexo A muestra en detalladamente esta integración. En función de la complejidad del problema, el operario debe conocer qué dispositivos necesita y si el panel es el adecuado o conviene hacer mejoras.

En automatización industrial, existe una gran diversidad de dispositivos, que se engloban en lo que se conoce como interfaz persona-máquina (*HMI human-machine interface*) de manera que aquí no se pretende abordar el tema en detalladamente sino tan sólo ofrecer un panel de mando apto para su uso con la guía GEMMA. La comprensión de la fase de interacción es vital para que el usuario pueda clasificar las diversas situaciones que se dan en el sistema automatizado y procesar la información e intervenir con coherencia.

El detalle de cada uno de los dispositivos se comentará con más detalle cuando se aborde la utilización de la guía GEMMA. Baste decir aquí que el panel de mando está formado por un conjunto de dispositivos informativos visuales DIV situados en la parte superior del panel, y por un conjunto de controladores situados en la parte inferior del panel.

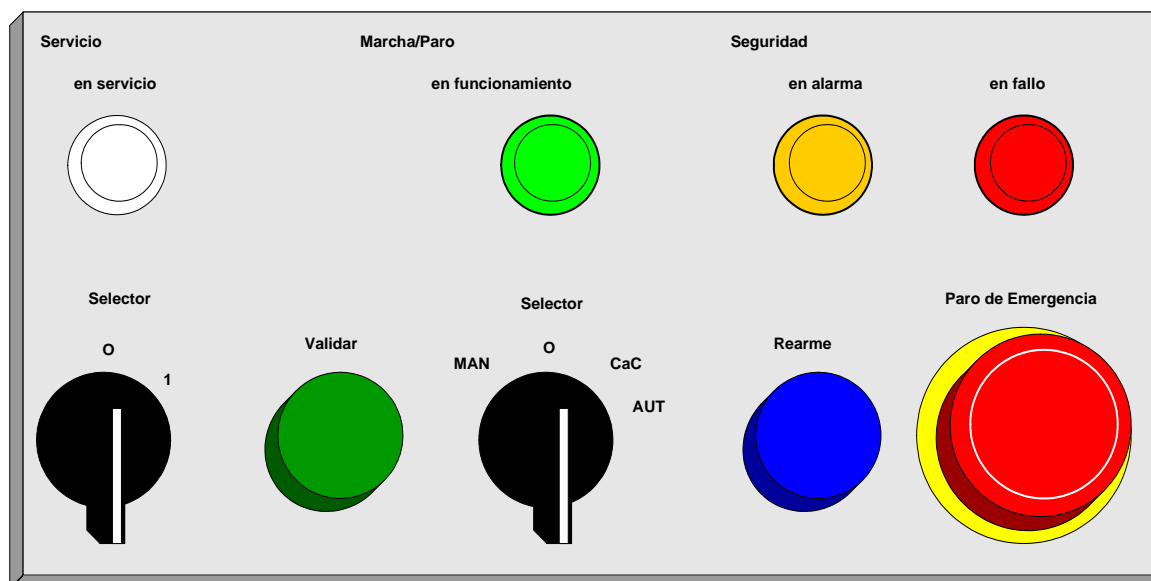


Fig.3.3 Panel de mando básico para llevar a cabo la intervención del operario

Este panel puede situarse físicamente en una zona cercana a los controladores y a la planta y/o máquina. Si es necesario, también puede complementarse con paneles auxiliares de accionamiento individual de actuadores, aunque para su utilización en sistemas electroneumáticos, por ejemplo, podemos acceder a los actuadores directamente sobre las electroválvulas que dispongan de accionamiento manual.

Otra posibilidad de auge reciente radica en diseñar dispositivos -tanto informativos como controladores-, mediante librerías de instrumentación virtual, de forma que los objetos gráficos forman parte de terminales programables alfanuméricos, monitores táctiles u ordenadores industriales.

Una vez realizadas las fases de automatización, supervisión e interacción, y antes de seguir con el resto de fases, el operario puede rehacer convenientemente cada una de ellas a medida que aumenta el conocimiento experto del funcionamiento del sistema. A continuación, se procede a las fases de implementación y pruebas.

### Implementación

Sin duda, ésta es la parte más práctica del método y escapa a las pretensiones de este libro. Son sus pasos más significativos:

- Selección del lenguaje de programación del automatismo.
- Traducción de GRAFCET a lenguaje de programación.

Esta fase requiere las habilidades prácticas del operario en la programación de automatismos. Respecto a la traducción de GRAFCET a lenguaje de programación de autómatas -como, por ejemplo, el esquema de contactos-, algunos usuarios utilizan el GRAFCET de tercer nivel en su descripción operativa. Otros usuarios prefieren pasar directamente el GRAFCET de segundo nivel, en su descripción tecnológica, al formato de esquema de contactos. Existe otra posibilidad, que es la formulación de las etapas y transiciones del GRAFCET en la forma de biestables S/R (*S set*, *R reset*). Cabe destacar que el usuario debe respetar las singularidades observadas, ya que cada casa comercial

genera su lenguaje de programación conforme a unas normas propias de diseño, de manera que lo único que queremos recalcar aquí de forma genérica es que la representación formal de la guía GEMMA ha de implementarse adecuadamente en el autómatas programable correspondiente.

Una vez la fase de implementación está consolidada, hay que establecer la fase de pruebas.

### **Pruebas**

Una vez implementado el algoritmo general sobre el automatismo, el operario puede verificar dicho algoritmo por partes; vigilar la evolución del proceso o interactuar con el proceso controlado mediante el panel de mando, e incluso puede emular situaciones de emergencia para analizar cómo responde el sistema automatizado ante la implantación de la guía GEMMA. Frente a situaciones problemáticas, el operario puede depurar los algoritmos parciales, o añadir más estados que inicialmente no se habían tomado en consideración y rehacer el algoritmo general.

Evidentemente, para afrontar problemas complejos se recomienda dividir el problema en módulos funcionales básicos, y así poder rehacer el algoritmo de forma metódica sólo en las partes a rehacer. Conviene tener muy clara la identificación del aspecto a resolver y clasificar, si es posible, a qué fase corresponde.

La comprensión del método genérico que se acaba de exponer pasa por la amplia experiencia en el sector industrial de la automatización y claramente por la puesta en práctica de las ideas aquí expuestas.

Centrando el tema de nuevo en la guía GEMMA, es conveniente no perder de vista las fases de supervisión e interacción, ya que en este libro se considera que la fase de automatización ya está realizada previamente, mientras que las fases de implementación y pruebas pertenecen al dominio práctico del puesto de trabajo.

Así, el operario encargado de llevar a cabo la puesta a punto de la guía GEMMA tiene una tarea interna más restrictiva. Si hace frente a un problema complejo, lo dividirá y afrontará de forma modular, y de forma iterativa irá completando el análisis hasta obtener una guía adaptada al problema en cuestión. Para mostrar en detalle las tareas de este operario la figura 3.4 se acerca a los diagramas característicos que aparecen en las referencias bibliográficas sobre supervisión.

El operario vigila el proceso controlado y puede decidir intervenir en el momento oportuno mediante la actividad sobre el panel de mando; la tarea del operario se complementa con su acceso al proceso para resolver *in situ* problemas de la producción.

El detalle en que se explica la puesta a punto de la guía GEMMA en este libro pasa por la representación gráfica convencional, el diseño del panel de mando en función del tipo de intervención humana y la especificación del control secuencial mediante GRAFCET (sin entrar a analizar el lenguaje de programación concreto, que formaría parte ya de la fase de implementación).

## **3.3 Representación**

En este apartado se presenta la representación gráfica convencional de la guía GEMMA, para que el usuario se familiarice con su nomenclatura.

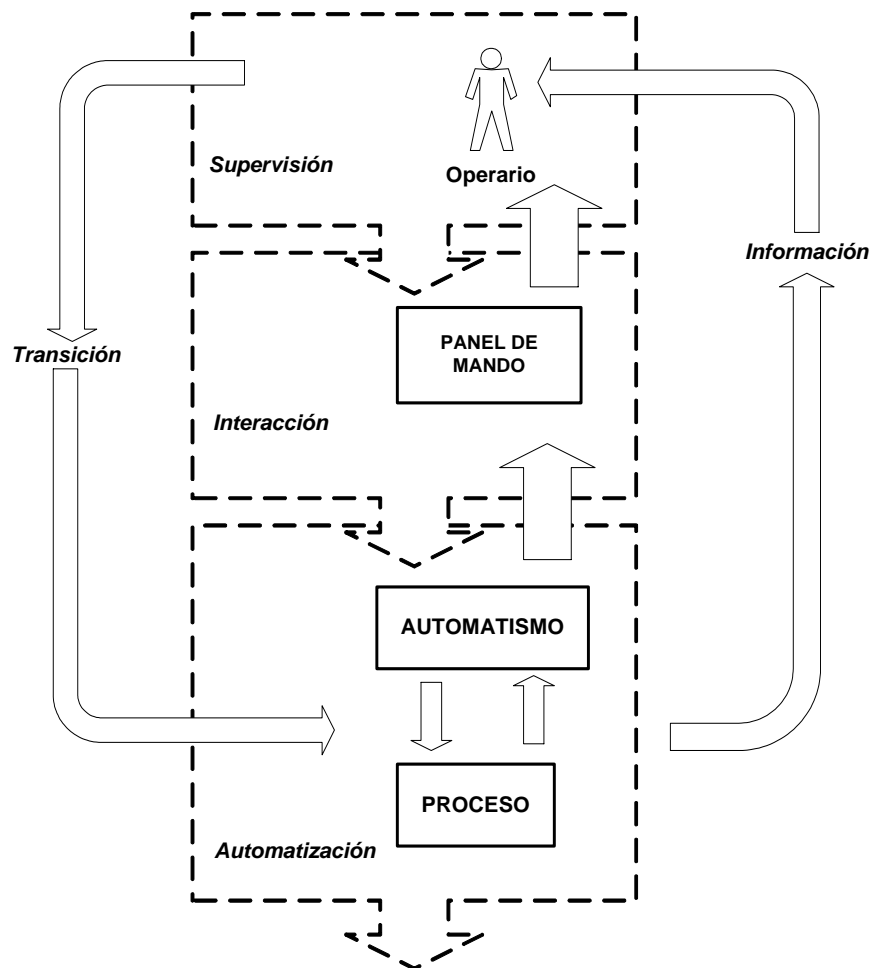


Fig. 3.4 Marco de aplicación de la guía GEMMA

### 3.3.1 Representación gráfica convencional

La representación estándar de la guía GEMMA superpone dos diagramas. El primer diagrama es conceptual y representa algunas situaciones en forma de rectángulos grises. La guía GEMMA distingue cinco situaciones relevantes:

- PZ: Existencia o no de energía de alimentación sobre el global operario-automatismo-proceso.
- Tres familias de modos de marchas y paradas
  - A: Procedimientos de parada.
  - F: Procedimientos de funcionamiento.
  - D: Procedimientos de fallo.
- Producción de piezas o material continuo.

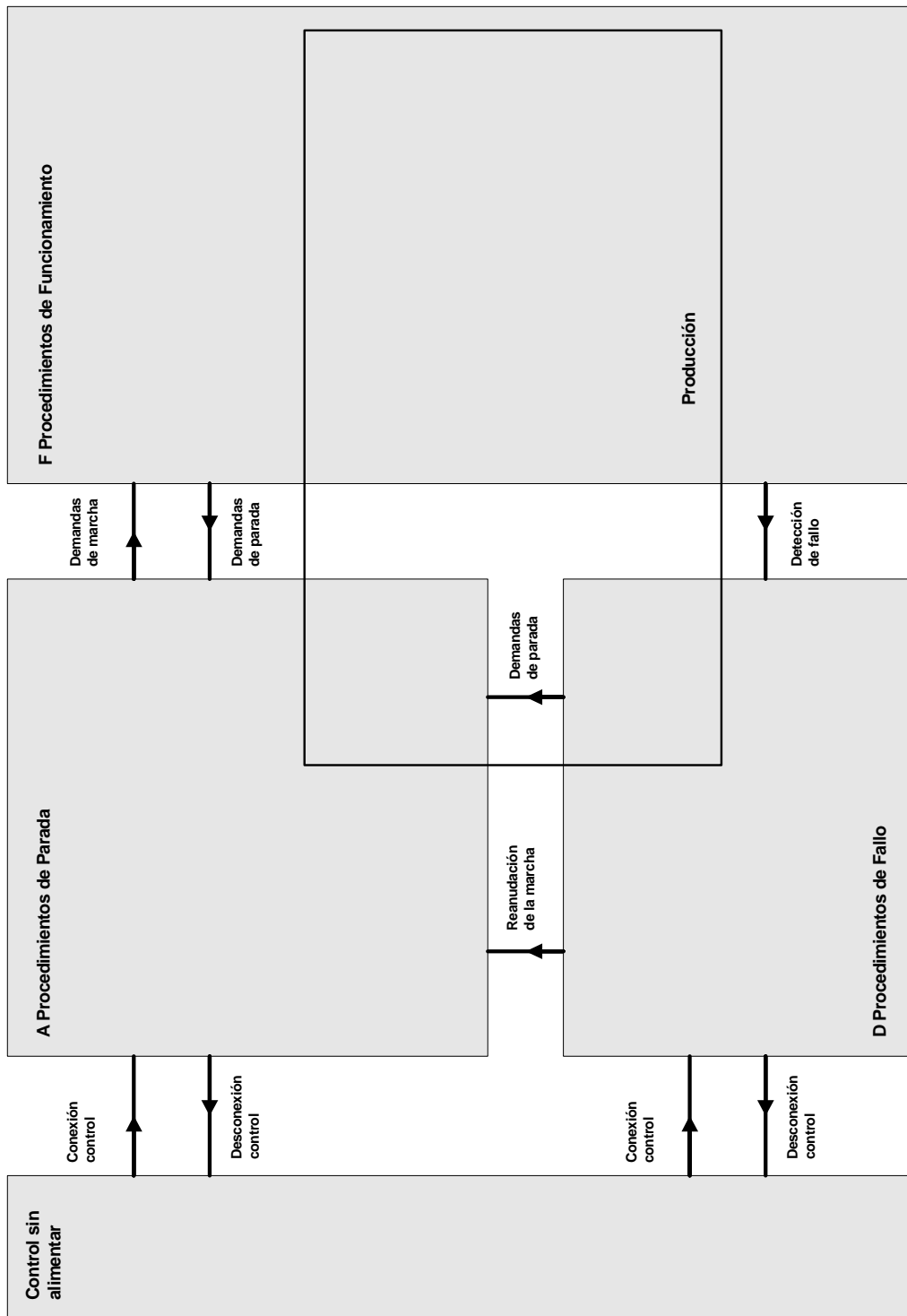


Fig. 3.5 Representación de la primera parte de la guía GEMMA

Las siglas corresponden a la notación original de la guía en francés. La figura 3.5 ilustra las cinco situaciones sobre una representación bidimensional. A la izquierda, tenemos el rectángulo asociado al control con/sin alimentación y que tiene la función de alimentación eléctrica del sistema automatizado. Este concepto viene impuesto originalmente por las normas de seguridad consideradas en la concepción de la guía, e ilustra el caso en que, sin alimentación, el accionamiento de los pulsadores de marcha y paro no provoca ninguna acción, así como ante una falta de alimentación el automatismo deja de ejercer control automático. A continuación, se añade el rectángulo conocido por la etiqueta genérica *A* (*procedimientos de parada*), cuya función principal es la de reconocer los posibles estados de reposo del sistema. A la derecha, se dispone el rectángulo asociado al funcionamiento, que se conoce por la etiqueta *F* (*procedimientos de funcionamiento*) y engloba no tan sólo el funcionamiento normal automático sino el funcionamiento de verificación y pruebas por parte del operario. Finalmente, se añade en la parte inferior el rectángulo asociado a *D* (*procedimientos de fallo*), pues se entiende que estos procedimientos engloban la presencia de defectos en el producto, la presencia de fallos de los dispositivos (actuadores, sensores) y el tratamiento de situaciones de emergencia.

Sobre este esquema se añade un quinto rectángulo denominado producción y dibujado normalmente en forma de doble línea discontinua. En este libro y para simplificar la representación éste rectángulo se dibuja tan solo con una línea discontinua. La Figura 3.5 ilustra que el rectángulo asociado a Producción presenta intersección con los rectángulos que ilustran las familias de procedimientos A, F y D, ello indica que la guía GEMMA diferencia situaciones en las que no se está produciendo producto alguno (operaciones de verificación, mantenimiento, emergencia).

En condiciones normales, existe la transición desde los procedimientos A hacia los procedimientos F, y viceversa, si se desea finalizar la tarea. En condiciones anómalas, la situación es más compleja, ya que de los procedimientos F se pasa a los procedimientos D y, para volver a reiniciar y reestablecer el funcionamiento en condiciones normales, hay que pasar a los procedimientos A. Aunque estas apreciaciones parezcan simples, indican cómo la guía GEMMA intenta planificar de forma determinista el funcionamiento del proceso, el control del mismo y la presencia de posibles contingencias.

A continuación, el segundo diagrama de la representación de la guía GEMMA resulta más detallista. Cada familia PZ, A, F o D se detalla en una serie de estados o modos con la finalidad de mostrar cómo la guía GEMMA puede adaptarse a un gran número de situaciones y problemas. En este punto, es necesario definir la lista de modos, y representarlos de forma gráfica mediante rectángulos más pequeños de color blanco.

### **PZ: Procedimientos del control fuera de servicio**

PZ1: Puesta del control sin energía

Cuando el automatismo se queda sin energía, este estado se ocupa de los procedimientos a realizar para garantizar la seguridad.

Las condiciones para acceder a este estado son a partir de cualquier estado, voluntariamente o accidentalmente. La situación voluntaria solo debería darse cuando el sistema se encuentra en el estado A1, en PZ2 o en PZ3.

Las acciones que hay que llevar a cabo en este estado consisten básicamente en terminar los movimientos en curso, bloquear mecánicamente las cargas suspendidas o dejar sin alimentación la parte operativa (si no lo estaba ya).

**PZ2: Puesta del control en estado de marcha**

En este estado, se vuelve a alimentar el control, situación que puede ocurrir a partir de PZ1 y de forma accidental. En un automatismo, un procedimiento de chequeo es ejecutado automáticamente. El automatismo lleva a cabo un ciclo básico, denominado ciclo de *scan*, en el que se verifican los módulos de *hardware* de entradas y salidas, la ejecución de tareas organizadas por la CPU del automatismo y el cumplimiento del buen funcionamiento, dentro de los límites impuestos por el temporizador *watch dog*.

**PZ3: Puesta del control fuera del estado de marcha**

Se está en este estado cuando el control tiene energía pero no está operativo (STOP).

Las condiciones para acceder a este estado son a partir de A1 a petición del operario, o a partir de cualquier estado si se detectan anomalías en el automatismo (módulos de entrada/salida, memoria RAM, anomalías en la CPU o desbordamiento de *watch dog*).

Las acciones concretas consisten en reparar la avería, y llevar el sistema al estado PZ1 o al PZ2.

Para simplificar la representación gráfica de la guía GEMMA, los modos PZ1, PZ2 y PZ3 no se incluyen en la figura 2.6.

**F: Procedimientos de funcionamiento****F1: Producción normal**

Estado en el que la máquina está produciendo normalmente, realizando la tarea para la que está concebida. En su interior, se encuentra el algoritmo básico, expresado habitualmente como GRAFCET de producción o GRAFCET de base.

**F2: Marcha de preparación**

Acciones necesarias para que la máquina pueda entrar en producción (precalentamiento, carga de utillajes, calibración, etc.).

**F3: Marcha de finalización**

Acciones que hay que realizar antes de la parada (vaciado de tuberías, cambio de herramientas, limpieza, enfriamiento, etc.)

Los modos F1, F2 y F3 engloban el funcionamiento normal de algunas máquinas o procesos controlados. Como complemento a estos modos, los modos F4, F5 y F6 ilustran la necesidad de verificar algunos subprocesos por parte del operario:

**F4: Marcha de verificación sin orden**

Permite certificar movimientos individuales del ciclo, sin respetar el orden habitual (usualmente, en vacío). Es asimilable a la intervención del operario en la forma de control manual.

**F5: Marcha de verificación con orden**

Permite verificar paso a paso ciertos movimientos o ciclos del proceso (en vacío o produciendo). Es asimilable al control semiautomático y en aquellas fases de implementación y pruebas en las que el operario supervisa directamente y valida cada uno de los pasos.

F6: Marcha de test

Para la realización de operaciones de ajuste y mantenimiento sobre la instrumentación de control (comprobación de la activación de sensores, reajuste por desgaste, etc.).

#### **A: Procedimientos de Parada**

A1: Parada en el estado inicial

Estado inicial de reposo de la guía GEMMA. Se suele corresponder con el estado inicial del GRAFCET; de ahí que se represente con un rectángulo doble.

A2: Parada a final de ciclo

Cuando se solicita este paro, la máquina debe completar el ciclo y luego detenerse en el estado inicial. Al no solicitar este paro, no se produce interrupción alguna y el ciclo se repite automáticamente. Se trata de un estado transitorio hacia A1.

Tanto en la producción de piezas discretas como en la producción de material continuo, hay que establecer el inicio y el fin de ciclo; de ahí la importancia de los modos A1 y A2. Cuando la producción es continua y no es necesario finalizar el ciclo que se desarrolla en F1 sino repetirlo indefinidamente, el modo A2 no es relevante. Por otro lado, en algunas ocasiones se puede proceder a una parada, sin que sea necesariamente la de inicio, por lo que se desea una parada intermedia para luego reanudar el ciclo allí donde se había detenido.

A3: Parada en un estado determinado

Estado transitorio en el que la máquina debe continuar hasta detenerse en un estado diferente del final. Se trata de un estado transitorio hacia A4.

A4: Parada en un estado intermedio

La máquina está detenida en un estado distinto del inicial y el final.

Una vez comentados los modos A1, A2 y A3, los modos de la familia de procedimientos de parada deben completarse con los modos A5, A6 y A7, que son necesarios si se ha producido una situación que requiere la activación del modelo de seguridad.

A5: Preparación para la Puesta en Marcha después de un Fallo

En este estado, deben efectuarse las operaciones necesarias para una nueva puesta en marcha después de un fallo/defecto (vaciado, limpieza, reposición de producto, etc.). Se trata de reconfigurar el sistema y, una vez concluida la preparación, habitualmente se asocia a un pulsador con la finalidad de rearme.

A6: Puesta del sistema en el estado inicial

Operaciones necesarias para llevar el sistema al estado inicial desde situaciones diferentes a la de producción: manual, parada de emergencia, etc. El resultado final es A1.

A7: Puesta del sistema en un estado determinado

Operaciones necesarias para llevar el sistema, que no está en producción, a un estado distinto del inicial para su puesta en marcha. El resultado final es A4.

Subsanadas todas las posibles contingencias, los modos A6 y A1 son consecutivos si se desea volver al inicio, mientras que los modos A7 y A4 son consecutivos si se desea reemprender el ciclo en estados intermedios.

#### **D: Procedimientos de fallo**

D1: Parada de emergencia (o parada para asegurar la seguridad)

Estado al que evoluciona el sistema después de accionar el paro de emergencia. Deben preverse un cese de actividades lo más rápido posible y las actuaciones necesarias para limitar las consecuencias del paro (tanto en la producción como para los operarios).

D2: Diagnóstico de fallos/defectos y/o tratamiento de fallos/defectos

Acciones a ejecutar para determinar el origen del fallo o el origen del defecto. Pueden realizarse con la ayuda del operario.

D3: Producción pese al defecto

Corresponde a casos en que se debe continuar produciendo a pesar del defecto (en una cadena de producción: sustituir transitoriamente parte del trabajo por el de un operario).

Cuando se accede a D2 a partir del modo D1, se está considerando la presencia de un fallo que conviene tratar de forma inmediata. Cuando se accede a D2 a partir del modo D3, se está considerando la presencia de un defecto como una contingencia a resolver cuando finaliza el ciclo actual; de ahí que se acceda posteriormente a los procedimientos de parada.

En estas líneas, se quiere distinguir entre fallo y defecto, pues se entiende que se trata de diversas degradaciones del funcionamiento normal, y es prioritario en la guía GEMMA el tratamiento de fallos frente al tratamiento de defectos.

Una vez explicitado el conjunto de 16 modos de las familias F, A y D, la representación gráfica convencional de la guía GEMMA consiste en la representación superpuesta de los dos diagramas mencionados. Falta añadir el conjunto de transiciones entre estados, que permite entender la representación gráfica a modo de ciclo en el que se integran el funcionamiento normal junto con la aparición de anomalías en secuencias cerradas.

Llegados a este punto, corresponde al usuario la tarea de adaptar la guía GEMMA e implementarla al sistema automatizado en cuestión. Sin duda, es una tarea compleja, ya que algunos modos no son tan sólo conceptos puntuales. Así, por ejemplo, en el modo D2, el diagnóstico de fallos/defectos ha evolucionado hasta el desarrollo de sistemas de control tolerantes a fallos, de manera que ya se dispone de aportaciones teóricas de nivel. Y el modo D1 de parada de emergencia esconde todo el tema de la seguridad en máquinas y las normativas asociadas.

Para finalizar estos comentarios sobre la representación gráfica, se puede hacer hincapié en el detalle de que la guía GEMMA ofrece de forma estática todos los posibles estados y transiciones, de la misma manera que el GRAFCET, en su descripción tecnológica, nos ofrece la representación estática del control secuencial. En este sentido, los diseñadores quisieron facilitar el aprendizaje de esta guía a los usuarios ya familiarizados con GRAFCET.

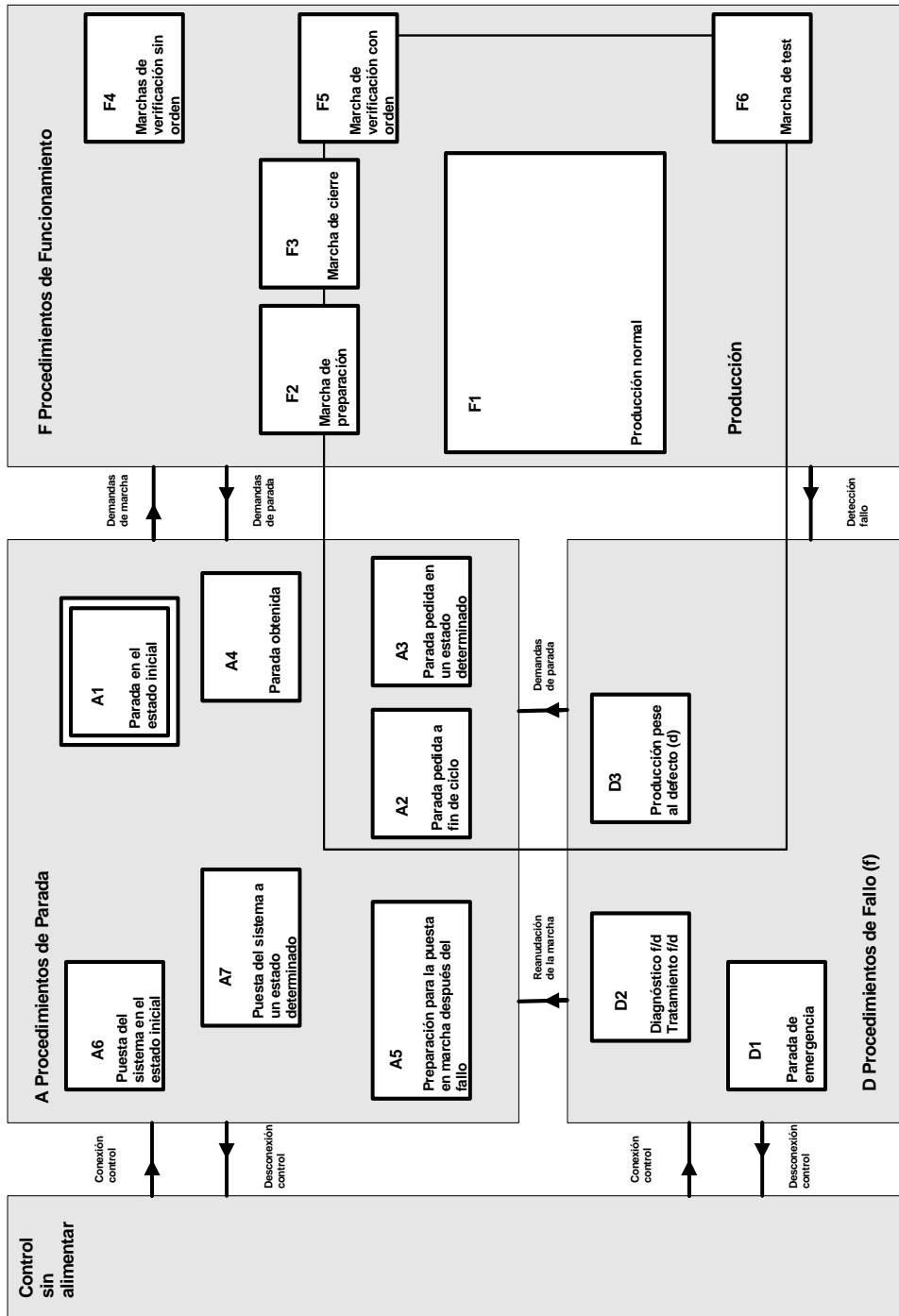


Fig. 3.6 Representación convencional de la guía GEMMA, únicamente con los 16 modos

### 3.4 Utilización

La utilización de la guía GEMMA pasa por dos etapas. La primera etapa es la comprensión y el uso práctico de la metodología a nivel básico, mientras que la segunda etapa corresponde a la aplicación a casos complejos, como los que se ilustran en los capítulos siguientes.

En este apartado se lleva a cabo la primera etapa, con algunos de las situaciones a estudio más significativas.

#### 3.4.1 Estudio de situaciones elementales

Sin duda alguna, la guía GEMMA empieza a mostrar su funcionalidad cuando se aplica al estudio de situaciones concretas. En las líneas siguientes se concreta la metodología únicamente en las fases de supervisión e interacción. Las situaciones a tratar son las siguientes:

- Situación 1: Marcha por ciclos y paro a final de ciclo
- Situación 2: Marcha de verificación con orden

##### **Situación 1. Marcha por ciclos y paro a final de ciclo**

En la fase de supervisión sólo intervienen el módulo de modos de marcha y el módulo de producción (figura 3.7). En la fase de interacción, el panel de mando está compuesto, en la parte de servicio, por el selector de servicio y el *led* indicador de servicio; en la parte de modos de marcha se dispone del selector (0, CaC, AUT) y el pulsador para validar la decisión. La intervención del operario se traduce de forma que, en condiciones normales de funcionamiento, inicia el ciclo de actividades seleccionando el modo automático AUT y validando con el pulsador, mientras que finaliza las actividades de un ciclo en ejecución seleccionando el modo ciclo a ciclo (CaC) y validando con el pulsador (figura 3.8).

Obsérvense las mismas ideas desde el punto de vista de la conectividad de GRAFCET parciales en la figura 3.9. Cuando el operario selecciona AUT y acciona el pulsador de validación en el GRAFCET de conducción G100, pasa a ejecutarse el algoritmo de control secuencial presente en el módulo de producción, GRAFCET de producción G0.

El GRAFCET de conducción G100 está estructurado en forma de estados ( $X$ ) y transiciones. El GRAFCET de producción G0 está estructurado en forma de etapas ( $E$ ) y transiciones ( $t$ ). Para aclarar la nomenclatura utilizada, sirva este ejemplo: el estado X101 está compuesto por la etiqueta 101 y la etapa 101, mientras que el estado X1 está compuesto por la etiqueta 1 y la etapa 1 y ésta a su vez puede contener una o más acciones. Habitualmente en el GRAFCET de conducción aparecen transiciones asociadas a los dispositivos del panel de mando, mientras que en el GRAFCET de producción aparecen transiciones asociadas al GRAFCET de conducción ya que existe una clara dependencia horizontal.

Si, mientras se desarrolla el GRAFCET de producción G0, el operario selecciona CaC y acciona el pulsador de validación, se conduce el algoritmo global al estado de parada en el estado inicial al finalizar el ciclo de ejecución actual (G0 al estado  $X0$  y G100 al estado  $X100$ ). En caso de que entremos en la etapa  $n+1$  valoramos si el operario ha seleccionado CaC y ha validado, con lo que G0 se reanuda en la etapa 0, o bien si el operario tenía seleccionado AUT y ha validado sin ordenar paro a fin de ciclo, con lo que G0 se reanuda en la etapa 1.

De esta forma, el operario introduce condiciones de marcha y paro dentro del control secuencial de un proceso, y ello puede ser útil para el seguimiento adecuado del proceso controlado.

Cabe indicar que la situación 1 es genérica y que, con matices, se puede aplicar en general a sistemas productivos, ya que, como se aprecia en la guía (figura 3.7) la descripción de los estados y las transiciones es independiente del tipo de proceso particular expresado en el GRAFCET de producción. Ello hace que esta situación sea intrínseca a la utilización de la guía GEMMA.

### **Situación 2. Marcha de verificación con orden**

En esta situación, en la fase de supervisión sólo intervienen el módulo de modos de marcha y el módulo de producción (figura 3.10). En la fase de interacción, el panel de mando está compuesto por tres partes: en la primera se dispone del selector de puesta en servicio (0, 1), junto con el LED informativo correspondiente; en la segunda se dispone el selector de modos (MAN, 0, CaC, AUT), junto con el pulsador de validación y el LED informativo de funcionamiento; finalmente, se dispone del selector de verificación con orden (Orden, 0) junto con el pulsador de verificación y el LED informativo correspondiente (figura 3.11).

En primer lugar, hay que indicar que la situación 2 expresa la modularidad en la construcción de la guía GEMMA. En la situación 2 se incorpora de forma natural la situación 1, tal como se aprecia en las figuras precedentes, tanto en la representación de la guía, como en el diseño del panel de mando y en la representación del GRAFCET. La intervención del operario puede acontecer al inicio de ciclo o en pleno desarrollo del mismo. En todo caso, cuando el operario selecciona el modo MAN y valida la decisión mediante el pulsador, se entra en el control manual (tanto si se trata del principio del ciclo como de cualquier momento del mismo). Si el operario selecciona MAN, a continuación el operario selecciona el modo orden y finalmente valida su decisión, y ya se está en disposición de ejecutar *F5: la marcha de verificación con orden*. Para la transición de una etapa a la siguiente, en el GRAFCET de producción no basta con las transiciones habituales sino que es el propio operario el que interviene en la transición y debe accionar el pulsador de verificación. Una vez ejecutados diversos estados mediante el estado F5 de la guía, el operario puede poner el primer selector en modo AUT y el segundo selector en modo 0, y accionando el pulsador de validación se reanuda el control automático.

Se deja para el lector la ampliación de la situación ilustrada en la figura 3.10 si se supone que el operario también puede ejecutar el estado *F4: Marcha de verificación sin orden*. Obsérvese que debe corregirse el selector (Orden, 0) considerando (Desorden, Orden, 0) y que el GRAFCET de conducción G100, después del estado 100 *X100*, presentará una tercera rama dentro de la estructura de secuencias excluyentes (lo que se conoce como paralelismo interpretado), con una transición del tipo *val·MAN·Desorden*.

Nótese que, en sistemas productivos continuos, la disposición del selector en cuatro modos (MAN, 0, CaC, AUT) puede simplificarse a tres (MAN, 0, AUT). Por ejemplo, en el llenado, la puesta de tapón y etiqueta de botellas, no es necesario el modo CaC, por lo que sencillamente poniendo el selector en el modo 0 y validando la decisión se detiene el proceso sin más problemas, y se reinicia seleccionando AUT y validando la decisión. En el caso de máquinas de extrusión de plástico en las que el operario repone, de forma continua, material para que la máquina genere piezas discretas, quizás tampoco es necesario el modo CaC. En máquinas-herramienta de control numérico computerizado CNC en las que la producción se realiza por lotes de piezas mecanizadas, el modo CaC es necesario para valorar aquellas situaciones (cambio de herramienta, mantenimiento preventivo) en las que el ciclo debe interrumpirse si el operario conoce la vida útil de la herramienta, o el desgaste de componentes en función del número de lotes producidos por la máquina.

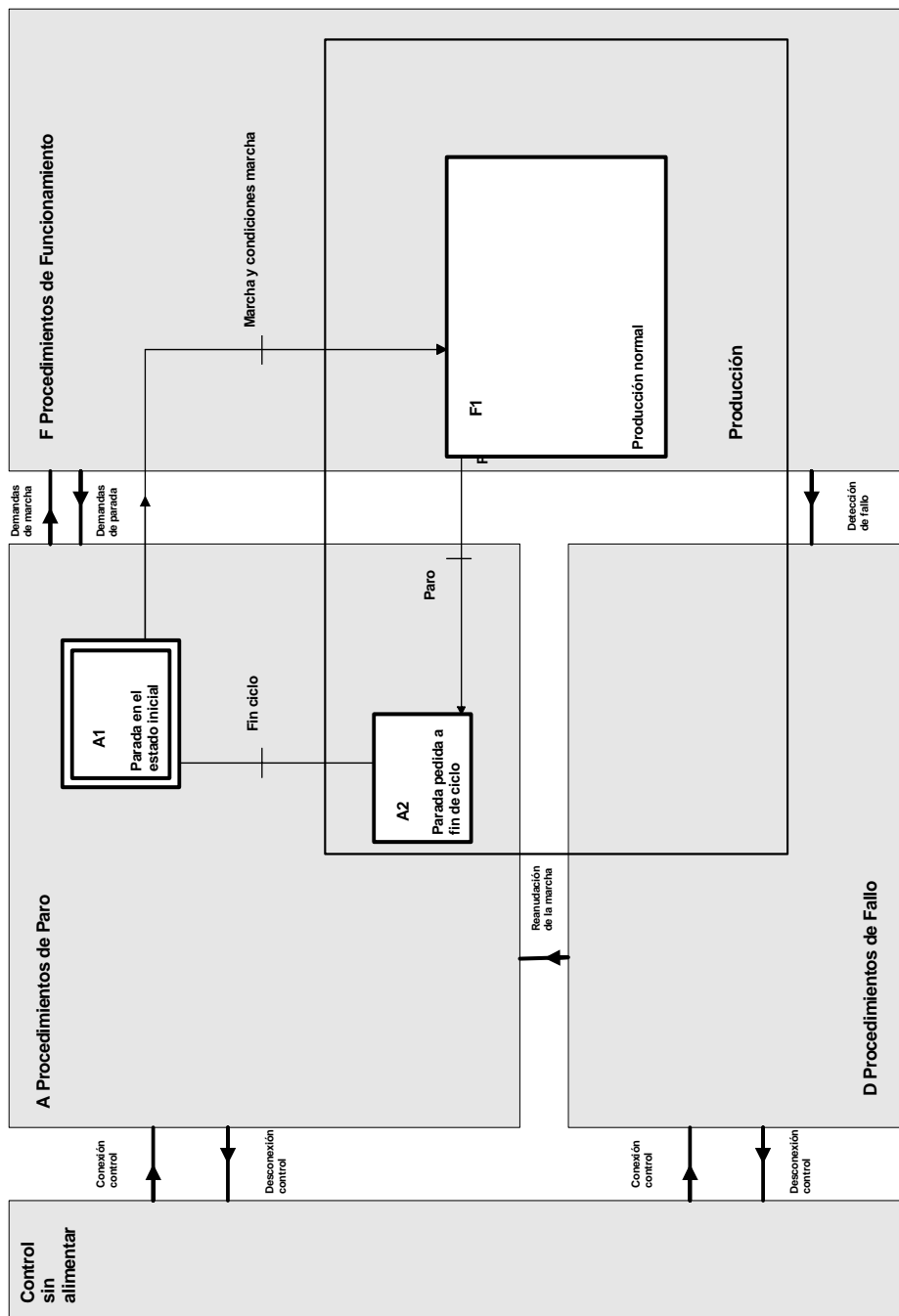


Fig. 3.7 Marcha por ciclos y paro a final de ciclo

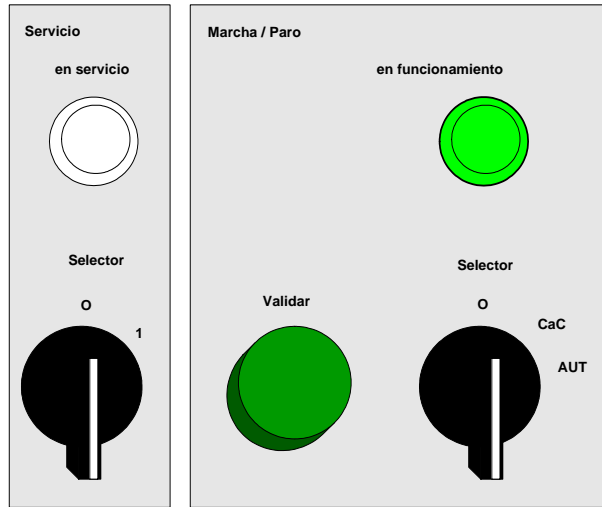


Fig. 3.8 Panel de mando para la situación 1

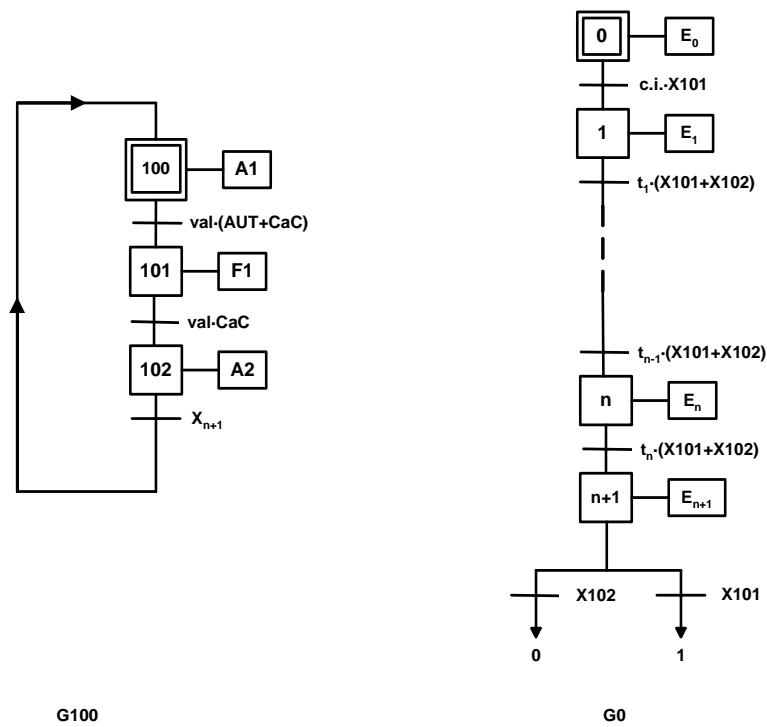


Fig. 3.9 GRAFCET de conducción G100 y GRAFCET de producción G0 para la situación 1

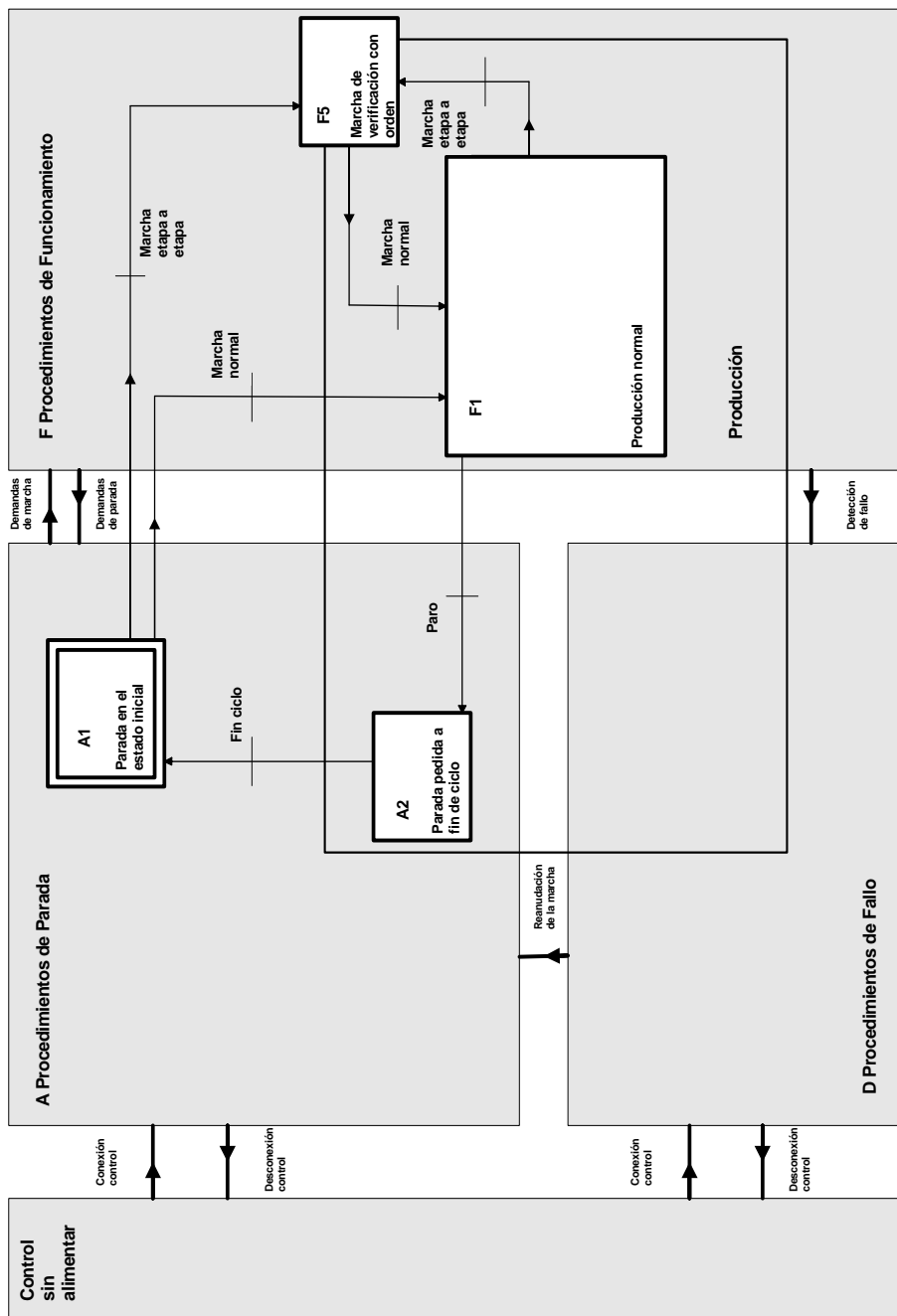


Fig. 3.10 Marcha de verificación con orden

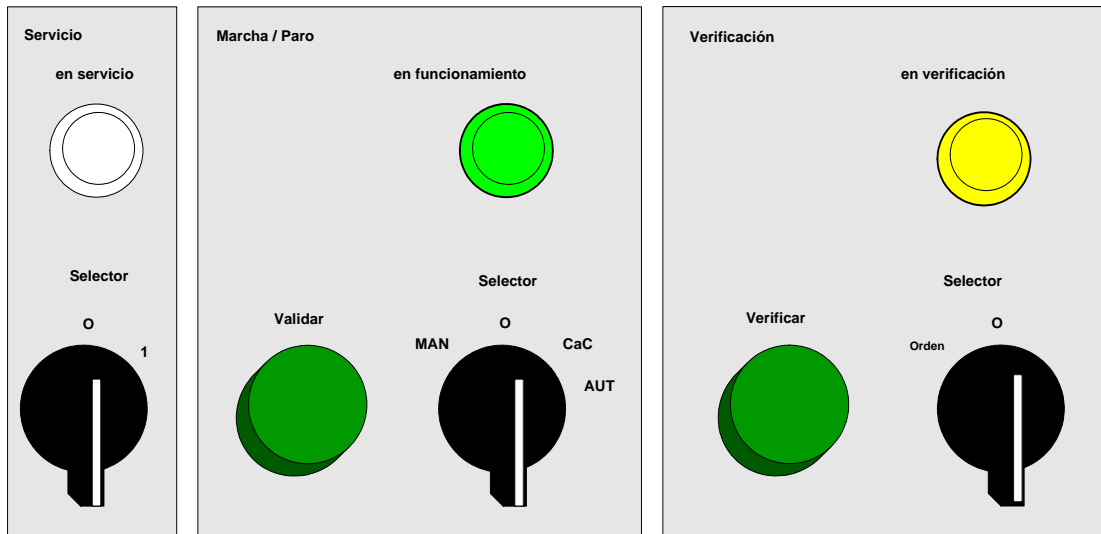


Fig. 3.11 Panel de mando para la situación 2

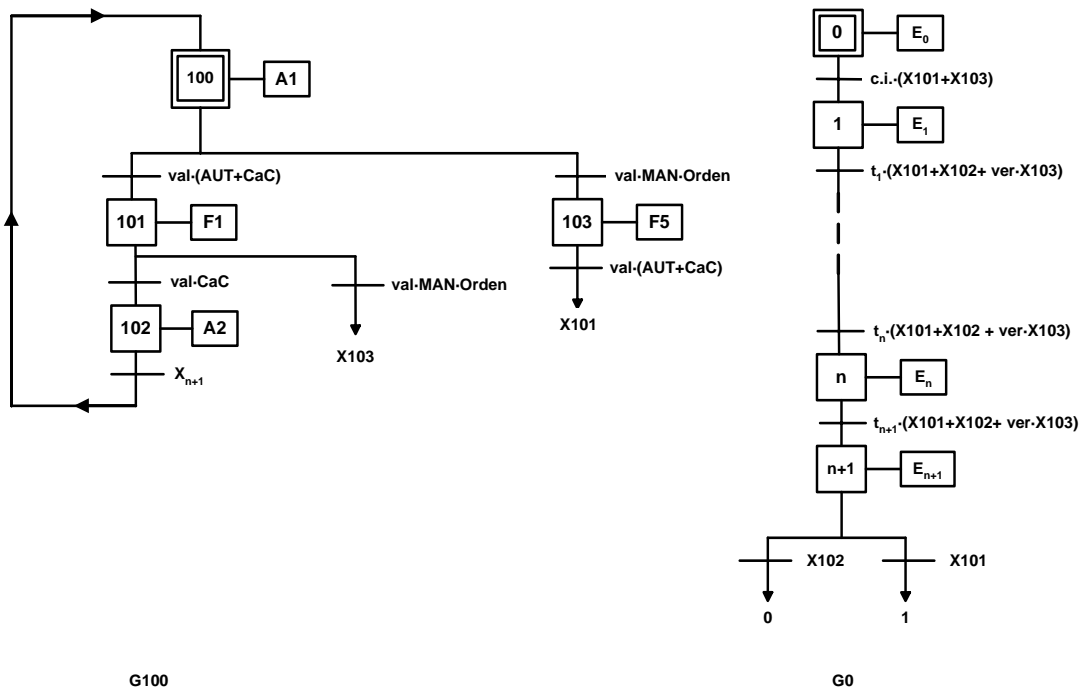


Fig. 3.12 GRAFCET de conducción G100 y GRAFCET de producción G0 para la situación 2

## 4. Diseño estructurado con la guía GEMMA

En este capítulo se detallan los aspectos avanzados de la guía GEMMA asociados a la automatización de procesos complejos. La exposición se inicia con una introducción, en la que se describe el forzado de GRAFCET, y a continuación se describe su utilización en el módulo de seguridad para establecer claramente la jerarquía superior respecto al módulo de Modos de marcha y al módulo de producción. Al forzado de GRAFCET le sigue la coordinación horizontal entre GRAFCET parciales, lo que permite establecer la conectividad global para un conjunto de GRAFCET parciales en el marco del diseño estructurado de sistemas de automatización. El capítulo concluye con un ejemplo práctico, que ilustra las grandes posibilidades de aplicación de la guía GEMMA en entornos industriales.

### 4.1 Forzado de GRAFCET

En el diseño estructurado de sistemas automatizados, se utiliza la representación de GRAFCET mediante diversos GRAFCET parciales. La relación entre GRAFCET puede establecerse, en una primera aproximación, mediante la inserción de estados en la receptividad de una transición. En esta situación, la evolución de las etapas de los GRAFCET parciales sigue las reglas de evolución ya conocidas cuando se detallan las reglas de GRAFCET en automatización.

Estas apreciaciones sirven cuando la conexión entre GRAFCET parciales es lo que se conoce como *coordinación horizontal*. En este apartado, se detalla el forzado de GRAFCET con unas reglas específicas a detallar, las cuales serán útiles en la relación jerárquica entre GRAFCETs parciales que van unidas al diseño estructurado de sistemas automatizados, y en lo referente a la relación entre el módulo de seguridad y los módulos restantes (módulo de modos de marcha, módulo de producción).

#### 4.1.1 Reglas de jerarquía

Consideramos que el lector ya está familiarizado con el GRAFCET y las reglas de evolución convencionales explicadas previamente en el capítulo 2. En este apartado, se añaden reglas de jerarquía y conviene establecer la relación con las reglas convencionales. Las reglas de jerarquía son:

- Si un GRAFCET tiene la posibilidad de forzar a otro, éste no tiene ninguna posibilidad de forzar al primero.
- En todo instante un GRAFCET sólo puede ser forzado por otro GRAFCET.

Las reglas de jerarquía se basan en la idea de diseño estructurado de sistemas y en un enfoque de tipo *top-down* en el que la visión global de cómo los GRAFCET parciales se integran entre ellos prevalece frente al enfoque *bottom-up*, en el que se focaliza la atención en un GRAFCET parcial concreto. Es indiscutible la primera regla de jerarquía, en la que la relación de forzado entre GRAFCET es unidireccional ya que así se concibe el diseño estructurado del sistema automatizado. La segunda

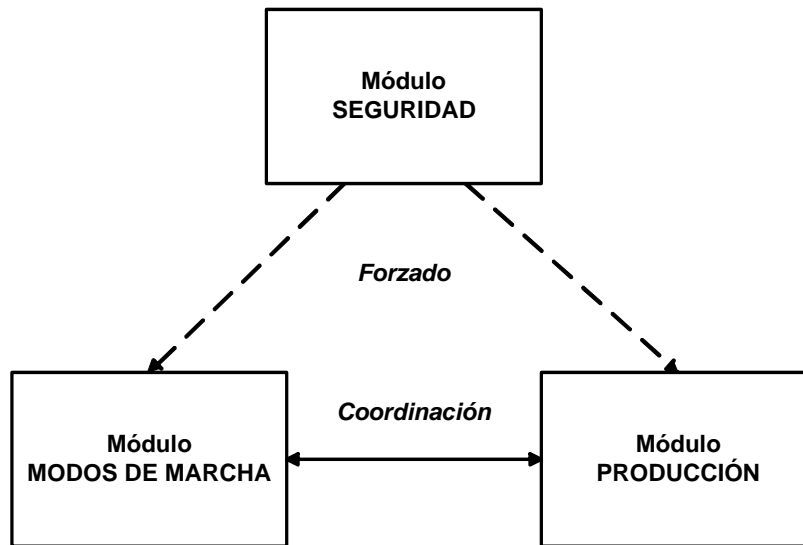


Fig. 4.1 Estructura modular del diseño estructurado de sistemas

regla nos indica la simpleza de la metodología, en el sentido de que sería problemático que un GRAFCET pudiera ser forzado desde diversas fuentes; la representación de los GRAFCET sería compleja, y se dificultaría una intervención segura y clara ante una situación de emergencia.

#### 4.1.2 Reglas de forzado

Las reglas de forzado permiten fijar la forma de interpretar una orden de forzado. Las reglas de forzado son:

- Cuando un GRAFCET parcial es forzado, debe pasar de forma inmediata y directa a la situación de forzado.
- La segunda regla relaciona el forzado con las reglas de evolución del GRAFCET convencional. Se divide en dos:
  - En cualquier cambio de situación, el forzado es prioritario respecto a cualquier otra evolución.
  - Las reglas de evolución del GRAFCET no se aplican en los GRAFCET forzados, y se permanece en esta situación hasta que no se desactiva la situación de forzado.

La figura 4.1 muestra la coordinación entre GRAFCET parciales que se encuentran en el mismo *nivel horizontal*, mientras que el módulo de seguridad se encuentra, jerárquicamente hablando, en un nivel superior, y desde el cual se puede activar la situación de forzado sobre el nivel inferior.

Las reglas de forzado indican que, en caso de activación del forzado, la dinámica de evolución que se seguía ha cambiado, es prioritaria la interrupción ejercida.

En algunos párrafos del capítulo 3; se indicaba cómo el operario puede ejercer tareas de vigilancia del proceso controlado; en la situación aquí representada, es el módulo de seguridad el que ejerce esta vigilancia sobre el resto de módulos.

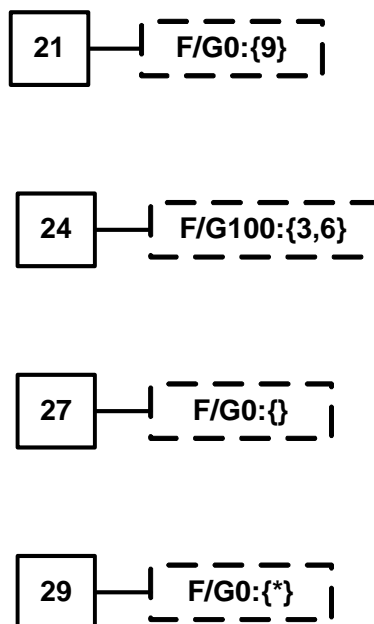


Fig. 4.2 Ejemplos independientes de la representación y utilización de la regla de forzado

#### 4.1.3 Representación del forzado

La representación de la orden de forzado se representa mediante la etiqueta F, seguida de una barra del tipo /; a continuación se añade el nombre del GRAFCET parcial que se quiere forzar; se añaden dos puntos : y se añaden, escritas entre llaves, las etapas que se desean activar.

En el primer ejemplo de la figura 4.2, al activarse el estado 21, se ejecuta la acción de forzado sobre el GRAFCET parcial de producción G0. Este GRAFCET pasa a tener activa la etapa 9 y desactivas el resto. No actúan las reglas de evolución clásicas. Esta situación se mantiene hasta que se desactive el estado 21.

En el segundo ejemplo, al activarse el estado 24, se ejecuta la acción de forzado sobre el GRAFCET parcial de conducción G100. Este GRAFCET pasa a tener activas las etapas 3 y 6, y desactivas el resto. No actúan las reglas de evolución clásicas. Esta situación se mantiene hasta que se desactive el estado 24.

En el tercer ejemplo, al activarse el estado 27, se ejecuta la acción de forzado sobre el GRAFCET parcial de producción G0. Este GRAFCET pasa a tener desactivas todas sus etapas. No actúan las reglas de evolución clásicas. Esta situación se mantiene hasta que más adelante se fuerce alguna etapa, en concreto en el GRAFCET G0.

En el cuarto ejemplo, al activarse el estado 29, se ejecuta la acción de forzado sobre el GRAFCET parcial de producción G0. Mientras el estado 29 esté activo, el GRAFCET G0 deberá mantenerse en la situación actual invariablemente. No actúan las reglas de evolución clásicas. Esta situación se mantiene hasta que se desactive el estado 29.

La nomenclatura utilizada en este capítulo contempla el módulo de seguridad mediante el GRAFCET parcial G20, el módulo de modos de marcha mediante el GRAFCET parcial G100 y finalmente, el módulo de producción mediante el GRAFCET parcial G0.

## 4.2 GRAFCET parcial de seguridad

Las reglas detalladas en el apartado anterior nos sirven para dar forma concreta al GRAFCET de seguridad.

En el momento en que el operario acciona el paro de emergencia, el estado *DI* de la guía GEMMA se asocia al forzado del GRAFCET de conducción y el forzado del GRAFCET de producción a sus etapas iniciales. En este instante, estos GRAFCET parciales quedan inactivos y prevalecen las reglas de evolución en el GRAFCET de seguridad. El paro de emergencia es un dispositivo con un contactor normalmente cerrado; de ahí que su estado inactivo habitual se representa por *E*, y en situación de emergencia por */E*. En la instalación, el paro de emergencia se sitúa como elemento en serie respecto, la alimentación del automatismo. Cuando el operario acciona el paro de emergencia, en realidad está cortando el suministro eléctrico al automatismo.

Tanto el forzado de GRAFCET parciales como la acción sobre el dispositivo se complementan para asegurar la seguridad del sistema. El sistema evoluciona ahora de *DI* a *A5* y finalmente a *A7*.

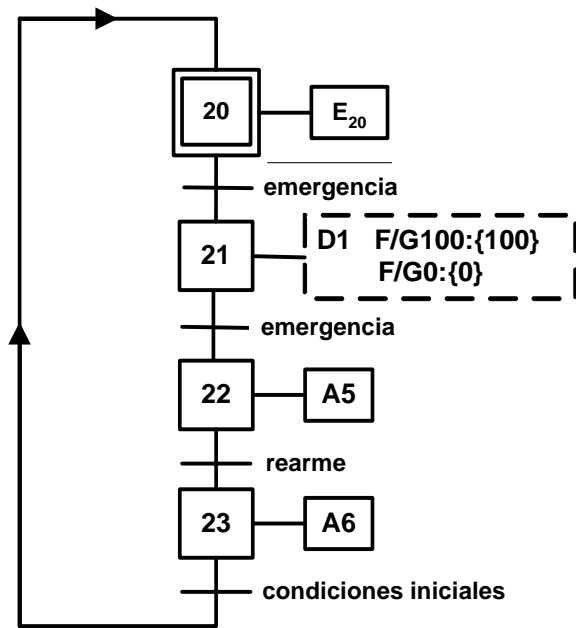
Cuando el operario valora la gravedad de la situación y corrige los incidentes más urgentes, puede proceder a desenclavar el paro de emergencia para devolverlo a su situación de reposo *E*. A continuación, se accede al modo *A5*, en el que hay que tener en cuenta los preparativos para la puesta en marcha después del fallo. Este modo lleva implícitas las tareas del operario, y en algunas situaciones, es preferible convertir el modo *A5* a un GRAFCET parcial denominado GRAFCET de rearme, para hacer más explícitas las operaciones. Finalizado este modo, el operario concluye esta actividad mediante una acción sobre el pulsador de rearme. La combinación de la utilización del paro de emergencia junto al pulsador de rearme garantiza un protocolo eficaz y ordenado en situaciones de emergencia. A continuación, se accede al modo *A6*, como paso previo al retorno al modo *A1*. En algunos procesos sencillos, basta con devolver los cilindros neumáticos al reposo, y disponer de la señal de los sensores de final de carrera para tener, de forma inmediata, el modo *A6* y el paso a *A1*. En algunos procesos más complejos, en los que la máquina debe vaciarse o enfriarse por ejemplo, el modo *A6* puede ser, en sí mismo otro GRAFCET denominado GRAFCET de puesta en inicio.

Existen situaciones en las que no es necesaria la transición de *F1: Producción normal* a *D1: Parada de emergencia*. Se trata del paso de *F1* a *D3* o de *F1* a *D2*. En estas transiciones, se llegará finalmente a modos de parada del tipo *A4* o *A1*. La representación de los modos *D2* y *D3* no se incluye como ramas de una secuencia excluyente en el GRAFCET de seguridad de la figura 4.3. En todo caso, se incluirán, si es necesario, en forma de ramas de secuencia excluyente en el GRAFCET de conducción, a partir del estado *X101* y modo *F1*.

## 4.3 Conectividad de GRAFCET parciales

Atendiendo a las explicaciones anteriores, superpuestas a las explicaciones del capítulo 3, el diseño estructurado de un sistema automatizado puede representarse mediante la combinación de seis GRAFCET parciales:

- GRAFCET de seguridad, *GSeguridad*
- GRAFCET de rearme, *GRearme*
- GRAFCET de puesta en inicio, *GPinicio*
- GRAFCET de servicio, *GServicio*
- GRAFCET de conducción, *GConducción*
- GRAFCET de producción, *GProducción*



**GSeguridad**

Fig. 4.3 Ejemplos de la representación del GRAFCET de seguridad

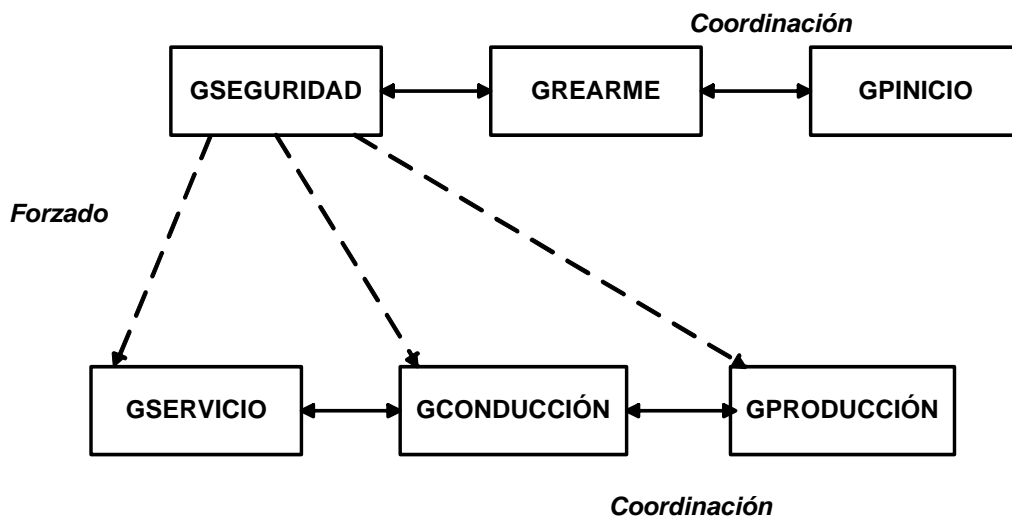


Fig. 4.4 Estructura modular completa

La estructura de los seis módulos integrados aparece en la figura 4.4. Desde el punto de vista de la jerarquía, el GRAFCET de seguridad se encuentra por encima del GRAFCET de servicio, el de conducción y el de producción. La línea discontinua indica la dirección del forzado. Desde el punto de vista de la coordinación horizontal se dispone de enlaces internos entre el GRAFCET de seguridad y el GRAFCET de rearme, entre el GRAFCET de servicio y el GRAFCET de puesta de inicio, etc.

Para interpretar la figura 4.4, conviene considerar la integración de GRAFCET parciales en un enfoque de tipo *top-down*. En primer lugar, hay que considerar el GRAFCET *GServicio*, el cual se había omitido en el capítulo anterior. Las actividades contempladas en este GRAFCET corresponden a conectar el automatismo, considerando que la máquina/proceso está preparada.

Cuando el operario procede a poner en servicio el sistema mediante el selector, el sistema se encuentra activo en el modo *AI*, y es el GRAFCET de conducción *GConducción* el encargado de dirigir las actividades. A partir de aquí, el operario selecciona el modo de trabajo (automático, ciclo a ciclo, de verificación) y se llega mediante coordinación horizontal al GRAFCET de producción *GProducción*.

Los tres GRAFCET parciales citados son de uso frecuente; de ahí que conviene tener claro su coordinación interna.

A continuación, el diseño estructurado muestra cómo proceder ante una contingencia para *asegurar la seguridad* del sistema, parafraseando las indicaciones originales de los diseñadores de la guía GEMMA. Cuando el operario procede a accionar el paro de emergencia, inmediatamente se procede al forzado de los *GServicio*, *GConducción* y *GProducción*, que pasan a sus estados iniciales respectivos.

La evolución entre GRAFCET queda bloqueada hasta reestablecer el funcionamiento; de ahí que ahora rige la evolución de etapas en el GRAFCET de seguridad *GSeguridad*. Ante la complejidad de algunos procesos para deshacer la situación de emergencia, que puede llevar implícita una serie de tareas por parte del operario sobre algunos actuadores/sensores, vaciado de máquina, etc., se ha preferido añadir un GRAFCET de rearme para que allí se vean de forma explícita estas acciones (figura 4.5).

El número de etapas dispuestas en *GRearme*; es arbitrario, en este caso concreto, se ha supuesto, por ejemplo, cinco etapas. Después de diversas actividades, el operario acciona el pulsador de rearme y da por acabada la situación de emergencia. Se entra en el modo *A6*.

De la misma manera que hemos realizado un GRAFCET de rearme, se ha preferido añadir un GRAFCET de puesta de inicio de la parte operativa *GInicio* para aquellos procesos en los cuales se requiera una serie de etapas pautadas para volver a situar el sistema en las condiciones iniciales *GServicio* y en el modo *AI*. La situación en la que se lleva al sistema a un estado intermedio *A4* no está incluida en *GInicio* y puede estar contemplada en una rama de secuencia excluyente en el GRAFCET de conducción *GConducción* a partir del estado *X101* y modo *F1*.

Es importante destacar que, en algún momento del *GInicio*, el operario puede poner todos los selectores del panel de mando en el modo *O*.

El número de etapas dispuestas en *GInicio* es arbitrario y, en este caso concreto, se ha supuesto por ejemplo, cinco etapas.

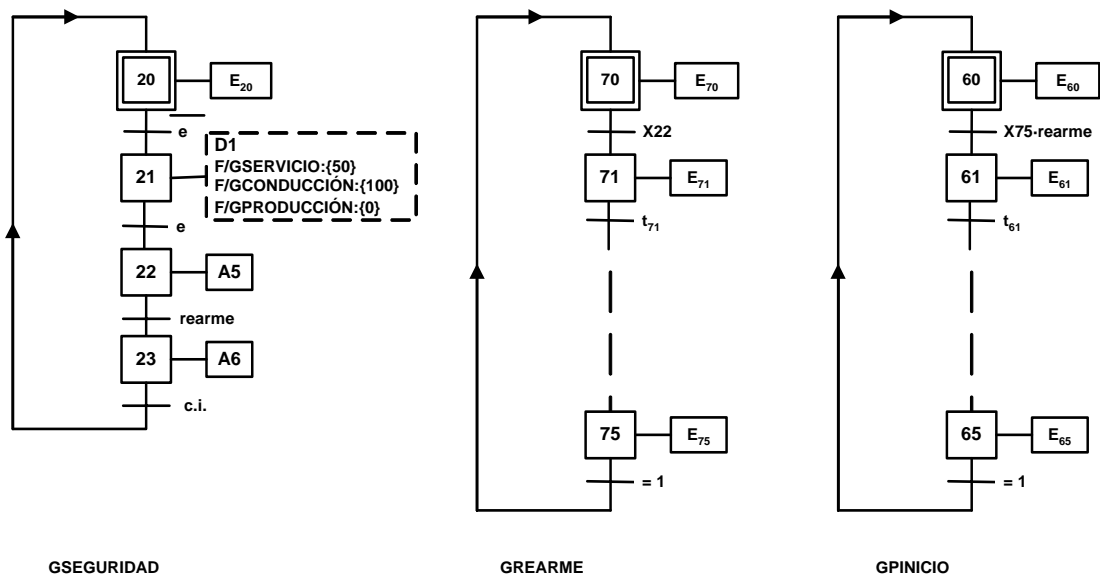


Fig. 4.5 Descripción de GRAFCET parciales (GSeguridad, GRearme, GPInicio)

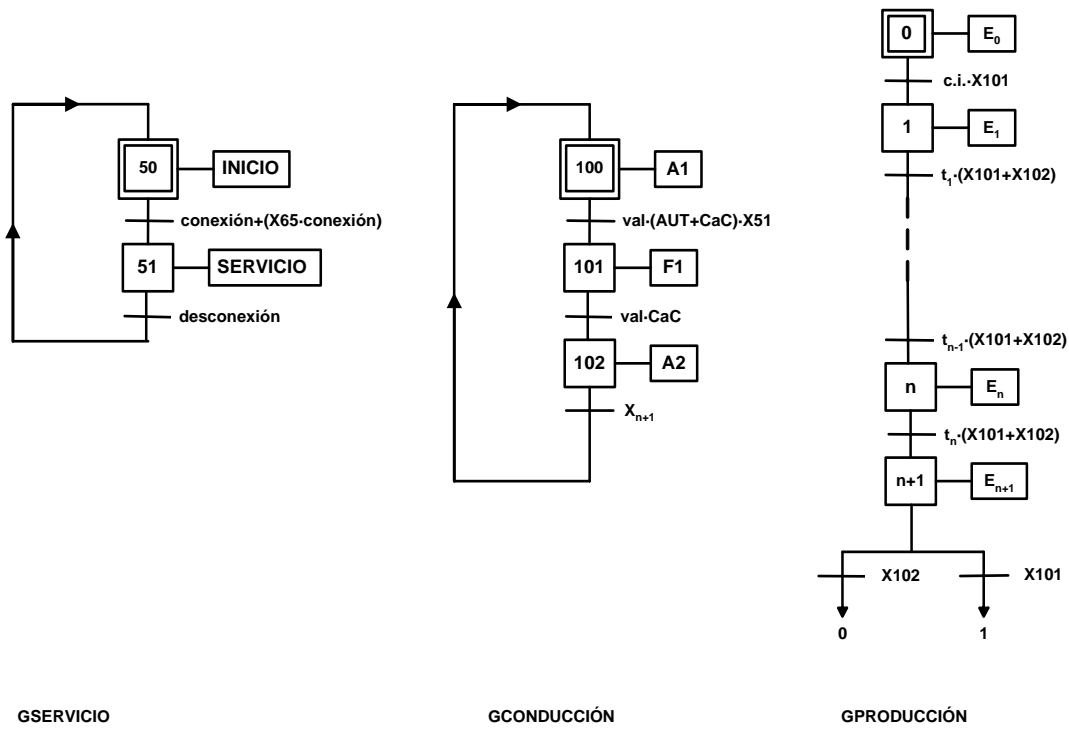


Fig. 4.6 Descripción de GRAFCET parciales (GServicio, GConducción y GProducción)

Así pues, en el momento en que concluye *GRearme* y accionamos el pulsador de rearme, se pasa al modo *A6* de la guía y; por tanto al GRAFCET parcial *GPInicio*. Una vez concluye el *GPInicio*, también concluye el *GSeguridad*, de ahí que se puede volver a reiniciar el sistema a través del *GServicio*.

En esta situación, se cumple la receptividad *X65-conexión*, con lo que definitivamente se puede poner en servicio de nuevo el sistema. Conviene reiterar que para algunos procesos/máquinas algunos GRAFCET parciales, pueden ser más sencillos y algunos estados de la guía mencionados pueden ser elementales.

La nomenclatura utilizada para la numeración de las etapas de los GRAFCET parciales ha respetado el orden de etapa 0 para el GRAFCET de producción habitual en las referencias clásicas sobre automatización. A partir de aquí se ha denotado de forma arbitraria el n. 100 para el inicio del *GConducción*, el n. 20 para el inicio del *GSeguridad*, el n. 50 para el inicio del *GServicio*, el n. 60 para el inicio del *GPInicio*, el n. 70 para el inicio del *GRearme*.

Esta ordenación numérica puede cambiar en función de la cantidad de etapas del sistema automatizado que se esté considerando.

#### 4.4 Estudio de caso práctico de posicionador de cable de un bobinador

En este ejemplo se muestra cómo aplicar la guía GEMMA a una parte concreta del procesado de cable de cobre de la empresa Pirelli Cables y Sistemas, empresa a la cual agradecemos la información facilitada.

En primer lugar, hay que centrarse en el nivel de automatización. Tan sólo se fijará la atención en una parte del proceso. El cable viene tensado por un desbobinador y pasa por una guía de posicionamiento para que posteriormente sea enrollada en el bobinador de forma correcta.

La guía de posicionamiento consta de un complejo formado por un conjunto de sensores y actuadores. Su función principal es generar un movimiento de vaivén sobre el cable que facilite su enrollado ordenado en la bobina. Consta de dos tuercas fijas externas y una tuerca interior móvil. Mediante un motor acoplado sobre el eje Z, se transmite el movimiento a la tuerca móvil, de forma que el cambio del sentido del movimiento del motor se traduce en un cambio de movimiento del cable sobre el plano X-Y, y así se genera el movimiento de vaivén deseado.

Para controlar el movimiento, se añaden dos microrruptores de posición mecánicos, a modo de finales de carrera. En el caso de control electrónico mediante autómata programable, es preferible considerar interruptores de posición electromecánicos. A efectos prácticos, en estas líneas argumentales los finales de carrera se denominan f0 y f1.

La figura 4.8 ilustra que el cable procede de la parte inferior de la figura, pasa a través de dos rodillos, sigue a través del subsistema posicionador (movimiento de vaivén izquierda-derecha) y, finalmente, se enrolla a la bobina (que tiene otro motor, que genera un movimiento de rotación para facilitar la agrupación del cable).

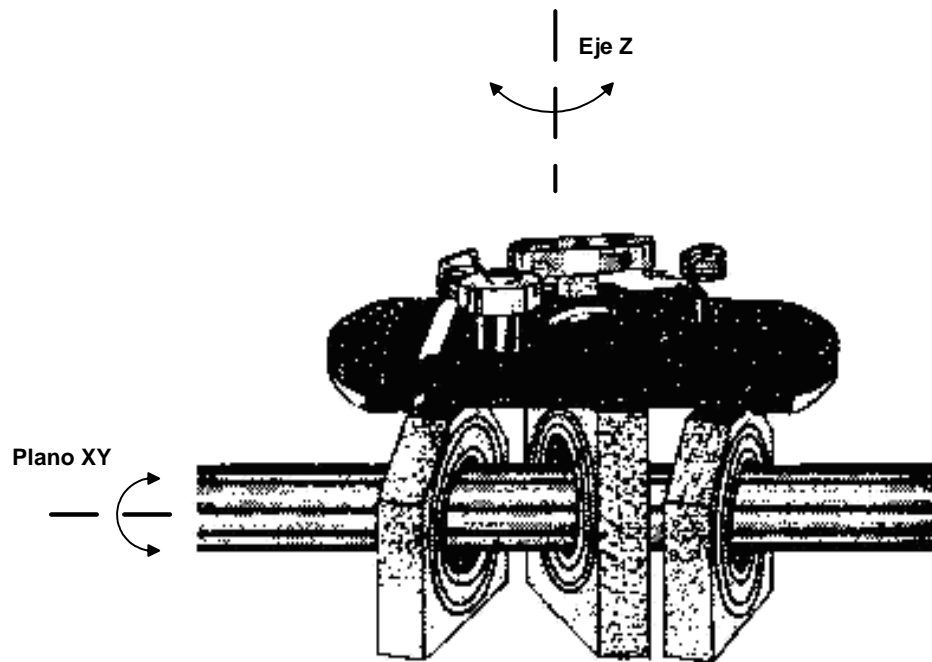


Fig. 4.7 Subsistema posicionado

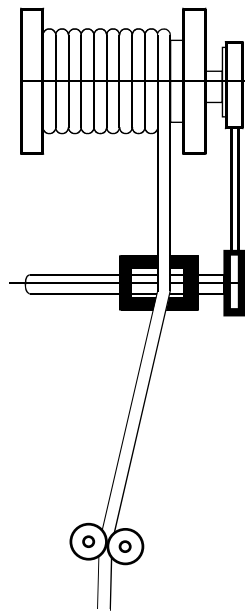


Fig. 4.8 Vista superior del conjunto bobina (arriba), posicionador (medio) y entrada de cable (abajo)



*Fig. 4.9 Detalle del proceso*

La figura 4.9 muestra el detalle, en fotografía, de la bobina y el subsistema posicionador.

En la fase de supervisión hay que fijarse en tres contingencias que aparecen con cierta frecuencia en el proceso de bobinado:

- Cable defectuoso: El grosor del cable es irregular debido a malformaciones o golpes, de forma que en algunas partes se observa un cambio considerable en el grosor que no supera el control de calidad.
- Cable trabado: La procedencia original del cable genera que, en algunas ocasiones, en el proceso de bobinar correctamente el cable las tensiones entre el desbobinador y el sistema posicionar generen interrupciones en el movimiento continuo del cable. Ello debe evitarse para que no se llegue a la rotura de alguno de los componentes.
- Accidente del operario: Al coexistir sistemas electromecánicos en movimiento con acceso libre del operario, se puede producir el atropamiento de dedos o muñeca del operario. Ello debe atajarse de inmediato mediante un paro de emergencia.

Estas contingencias indican que, en el caso que estamos tratando, aunque siguen siendo importantes los módulos de marcha y producción, es de especial relevancia el Módulo de seguridad (figuras 4.10, 4.11, 4.12). En la fase de interacción, cabe destacar que, junto a los elementos tradicionales de un panel de mando, hay que tener en consideración la aparición de un nuevo selector para designar dos posibles velocidades de marcha (velocidad baja, velocidad normal). La selección de velocidad baja nos permite actuar con cautela en el reinicio de actividades, después de resolver el caso de cable defectuoso (figura 4.10).

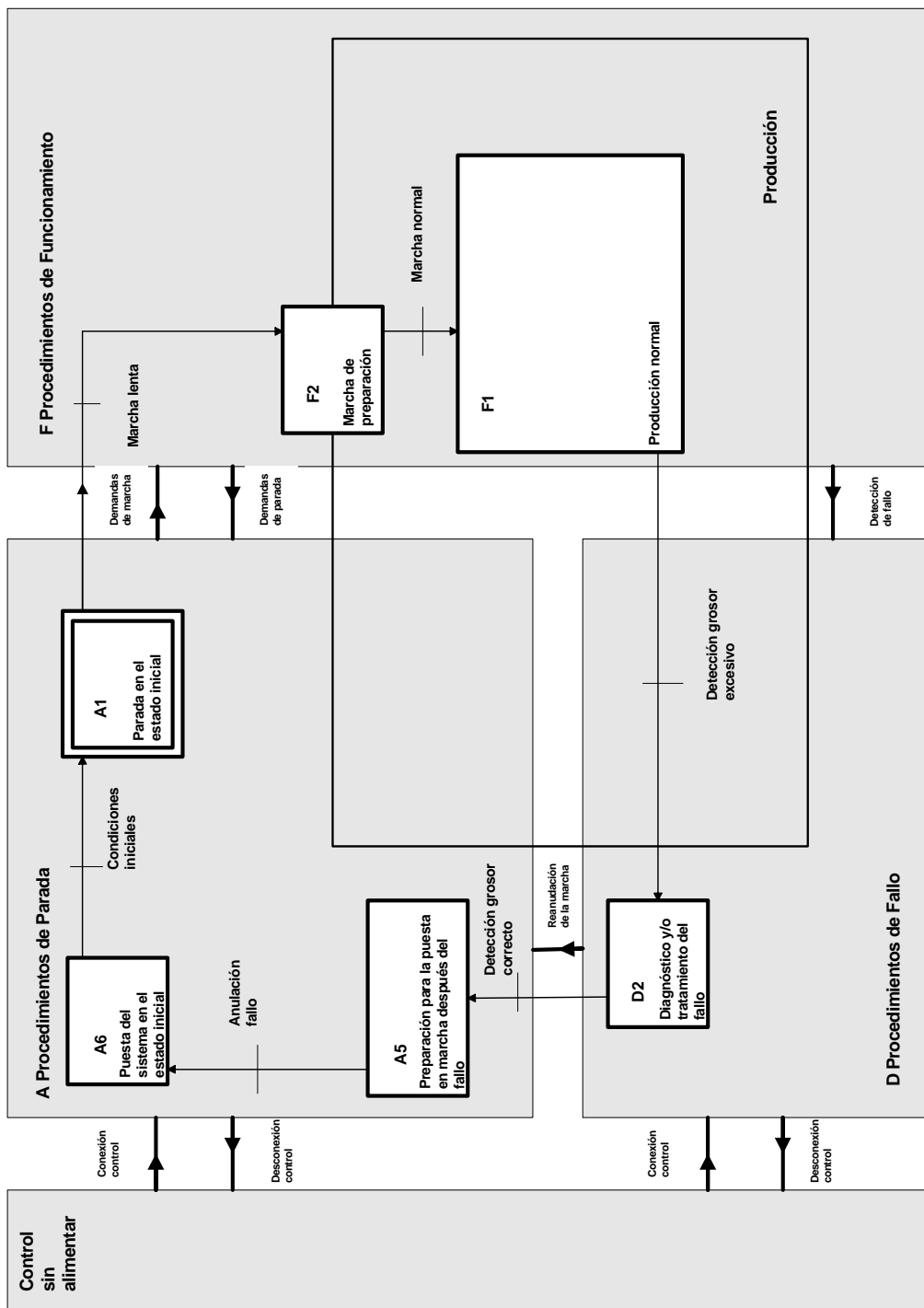


Fig. 4.10 Caso de cable defectuoso

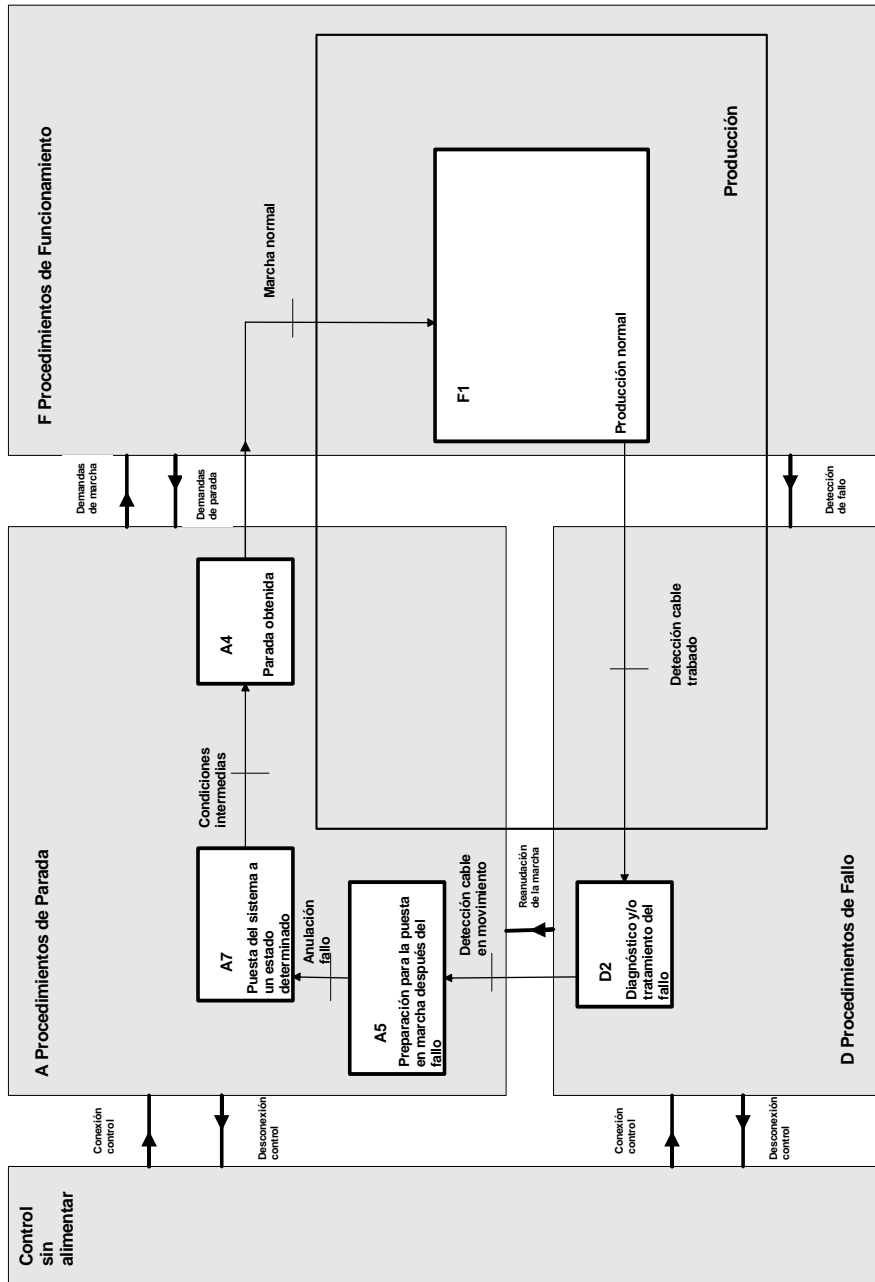


Fig. 4.11 Caso de cable trabado

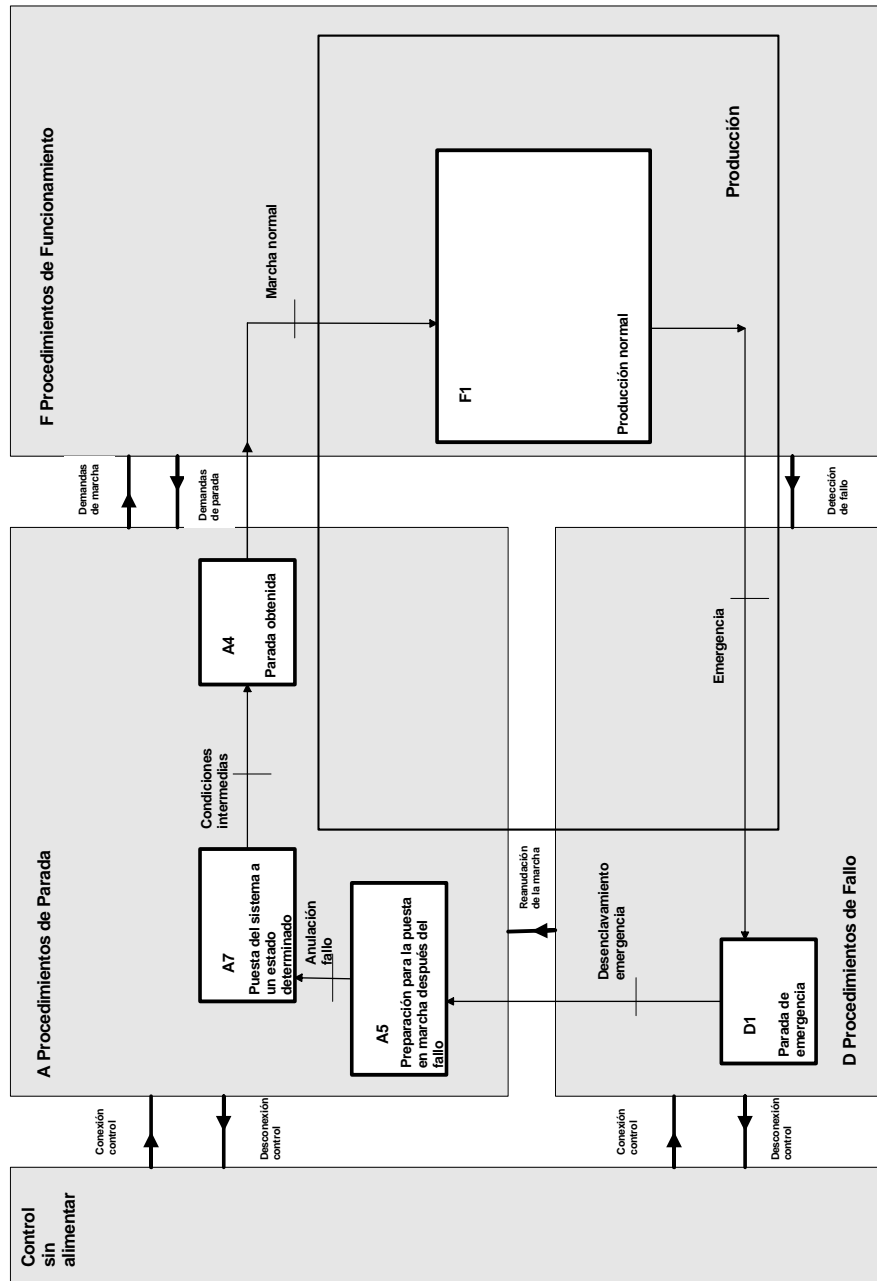


Fig. 4.12 Caso de accidente del operario

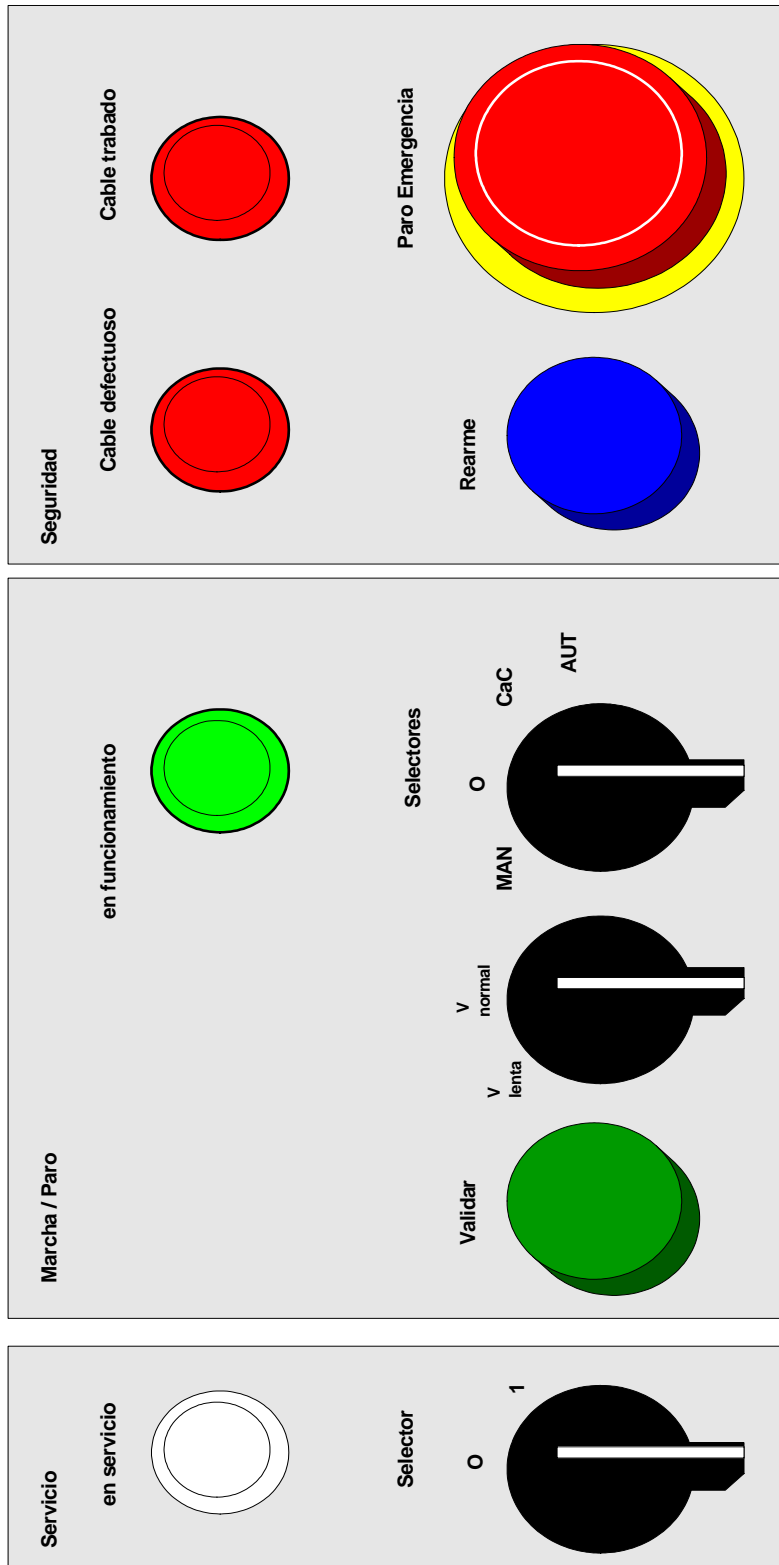


Fig. 4.13 Panel de mando para caso práctico

### **Caso de cable defectuoso**

La situación a tratar consiste en las irregularidades presentadas por el grosor del cable. En caso de que las irregularidades sean permitidas por el control de calidad, se dispone del estado *D3: Producción pese al fallo*, no incluido en las figuras 4.10 y 4.11, y en las que habría que añadir un LED indicador de color naranja al panel de mando). En caso de que el grosor exceda los límites permitidos, se activa el LED indicador del cable defectuoso.

El operario selecciona O y valida mediante el pulsador, de manera que detiene el proceso y decide cortar el trozo de cable que no presenta las condiciones óptimas, esto conlleva preparar el sistema para volver a empezar desde el inicio, como si se iniciase el bobinado de nuevo; de ahí que se vuelva al estado A1. Para arrancar de nuevo, selecciona AUT y v lenta, y valida con el pulsador; cuando comprueba visualmente que no hay situación de riesgo, selecciona AUT y v normal, y valida con el pulsador pasando al estado F1 de la guía.

### **Caso de cable trabado**

Debido a los movimientos de giro del desbobinador, junto con el desplazamiento del cable y de nuevo un giro en el bobinador, el cable está sujeto constantemente a tensiones. Si se da por hecho que el cable no presenta una superficie regular, el movimiento tampoco será estable; de ahí que puedan existir sacudidas o tensiones que provoquen que el cable quede trabado, lo cual queda indicado mediante el LED de cable trabado.

Si la situación no es excesivamente compleja, el operario puede detener el proceso mediante el selector en el modo O; a continuación, validar con el pulsador, y mover manualmente el desbobinador o sacudir el cable, de forma que se desbloquee el sistema. En este caso, aunque se ha producido una leve interrupción, no ha significado una discontinuidad grave, de manera que se puede reemprender la actividad sin la rotura de cable ni el paso por el estado A1, sino al estado A4. Finalmente, se selecciona AUT v normal, y se valida con el pulsador.

### **Caso de accidente del operario**

Otra situación a tener en consideración es la posibilidad que, ante sistemas electromecánicos en movimiento, la presencia activa del operario dentro del volumen de trabajo de máquinas provoque atrapamientos de dedos o muñeca. Esto significa que, ante tal riesgo grave de accidente, un segundo operario debe activar el paro de emergencia. Esta situación se refleja en la figura 2.16, de manera que el proceso se detiene inmediatamente.

A continuación, el operario soluciona el problema, poniendo el primer operario a salvo, y, con las condiciones idóneas para reemprender la marcha, el operario debe anular la situación de emergencia desenclavando el pulsador de paro de emergencia y accionando el pulsador que se conoce habitualmente con el nombre de *rearme*. El sistema se conduce hasta el estado A4 para reiniciar la actividad.



## 5. Estudio aplicado de una estación trituradora-mezcladora

En este capítulo se presenta la aplicación detallada y completa de la guía GEMMA a un caso de estudio concreto. El objetivo es poder seguir la aplicación de la guía de diseño GEMMA desde la realización del GRAFCET de producción inicial –automatización básica - hasta completar todos los diferentes GRAFCET que acabará interactuando y configurando la automatización final del proceso. Como se ha podido ver en capítulos anteriores, la guía GEMMA considera una elevada cantidad de situaciones posibles con las que nos podemos encontrar cuando queremos automatizar un proceso. Es en este sentido que tenemos que ver GEMMA como una guía de aplicación y no como una exigencia en que deban entrar en consideración todos los casos posibles. Es imposible concebir todas las situaciones posibles de una sola vez y, además, plasmarlas de forma correcta en el correspondiente GRAFCET. No obstante, como veremos, la aplicación es sumamente sencilla si se aplica de forma incremental.

Antes de continuar y entrar propiamente en el desarrollo de la aplicación, debemos tener claro qué parte del proceso de automatización solucionamos con la aplicación GEMMA. Tal como hemos comentado en los capítulos precedentes, la aplicación GEMMA parte del hecho de que disponemos de *la automatización básica del proceso*, entendiendo como automatización básica aquella en la que se ha tenido en cuenta, únicamente, el ciclo de producción que realiza la máquina en cuestión. No hay consideraciones especiales sobre paradas de emergencia, funcionamiento manual y ciclo a ciclo, etc.; en definitiva, no consideramos la interacción con el operario. Esta segunda parte es la que realizaremos mediante la aplicación de GEMMA. Como resultado obtendremos un conjunto de diagramas GRAFCET, relativamente sencillos, que actuarán de manera coordinada entre ellos y que determinarán el avance del GRAFCET inicial, que implementa el ciclo de producción básico de la máquina o proceso en cuestión. Cabe recordar que esta coordinación entre GRAFCET muchas veces viene determinada por acciones del operario. Es en este sentido que la guía GEMMA veremos nos ayuda en el diseño del panel de operario, determinar qué entradas debe proporcionar el operario y qué información le podemos suministrar desde el programa de automatización.

Veremos, en primer lugar, una descripción del proceso a automatizar. A partir de esta descripción realizaremos el GRAFCET de producción, en el que plasmaremos el secuenciamiento de operaciones de la máquina. A partir de este punto, introduciremos

- Las especificaciones deseadas para la automatización completa de la máquina.
- La aplicación de la guía GEMMA para la implementación de estas especificaciones

### 5.1 Descripción del proceso

El proceso a automatizar es una estación trituradora-mezcladora. Está constituida por una primera parte, en la que una serie de dispensadores de producto nos permiten, escogiendo unidades de dispensadores diferentes, realizar la mezcla deseada. Una vez las cantidades de materia prima están

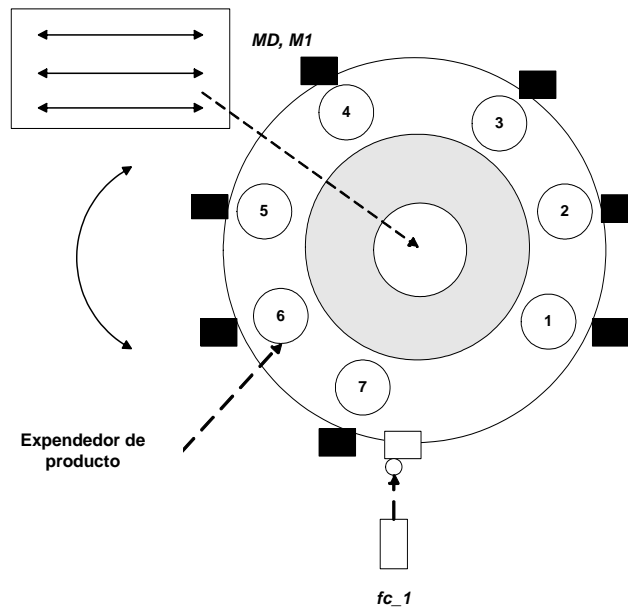


Fig. 5.1 Descripción del proceso (dispensadores)

seleccionadas, se trituran todas juntas para obtener el producto final (mezcla deseada). Finalmente, el producto se envía a la estación siguiente.

Tenemos siete tipos de productos diferentes; por tanto, siete dispensadores, situados sobre una base circular. Para escoger unidades de producto de un dispensador, debemos situar el correspondiente dispensador en la posición apropiada. Las unidades de producto, o pastillas, son empujadas una a una al recipiente en el que se realizará la mezcla. Esta base circular la podemos hacer girar hacia la izquierda y hacia la derecha, dependiendo del dispensador que debamos posicionar.

Un sensor de fin de carrera nos permite ir localizando los dispensadores y, de esta manera, gobernar el motor que hace girar la base circular.

El producto final a obtener viene determinado por una tabla, en la que se especifican, para cada tipo de producto básico (identificado por el número de dispensador), las unidades o pastillas que debemos mezclar. Cuando en la tabla encontremos un dispensador con identificador cero, será el indicador de que la composición está completa y que podemos proceder a activar la trituradora y realizar la mezcla. La trituradora será activada durante 5 segundos y, a continuación, también durante 5 segundos, abriremos la válvula para el vaciado de la mezcladora.

El sensor *s\_infra* nos permitirá detectar si hay pastillas en el dispensador. En caso de detectar falta de pastillas, esto nos permitirá considerar la interacción apropiada con el usuario para poder solucionar la situación y que el proceso pueda continuar.

A partir de esta descripción, realizaremos el GRAFCET de producción correspondiente a la automatización del proceso descrito. No entraremos en el detalle de los sensores y las señales utilizados. De hecho, lo que es importante en este estadio de la automatización es que tengamos claramente establecida la secuencia lógica de acciones. Una vez esta fase esté completamente finalizada, podremos proceder a la traducción del GRAFCET en términos de las señales y entradas/salidas de nuestro autómat. Con el fin de ganar generalidad, nos centraremos ahora, de momento, en la secuenciación de acciones.

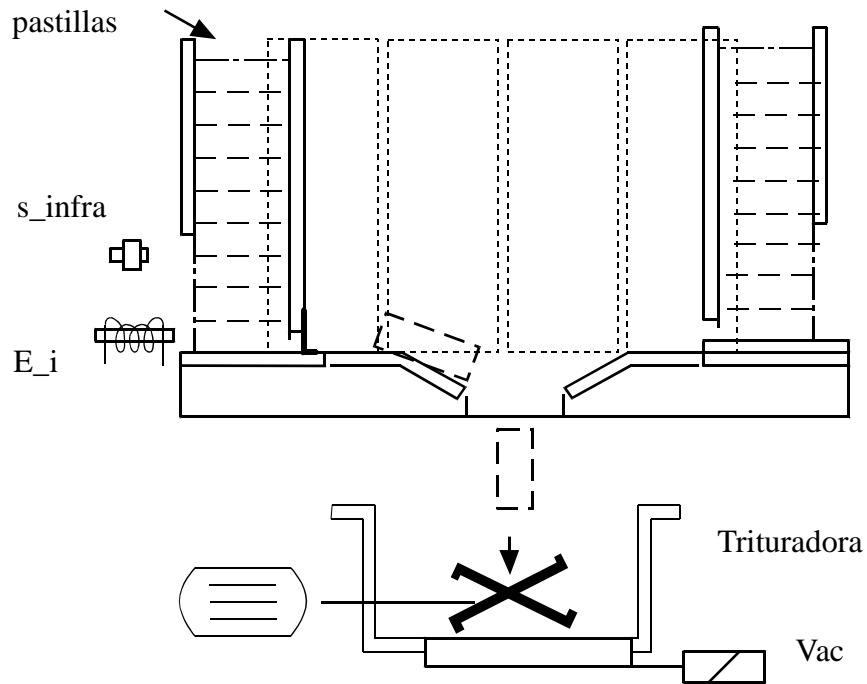


Fig. 5.2 Descripción del proceso (trituradora)

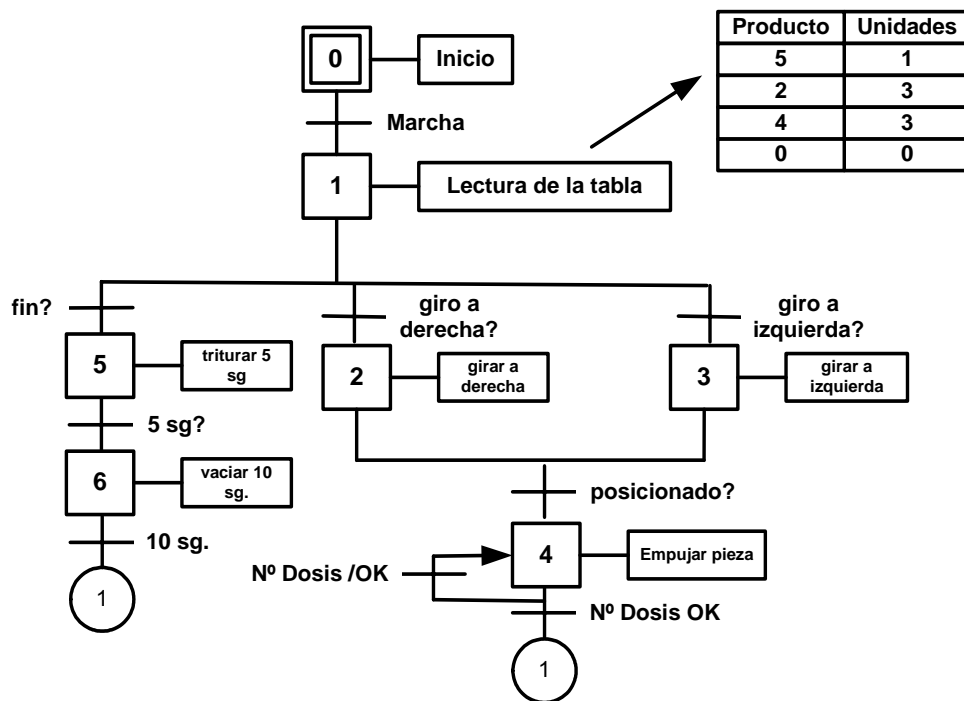


Fig. 5.3 GRAFCET de Producción (G0)

Como podemos comprobar, el GRAFCET de producción presentado es bastante esquemático. Nos referiremos a este GRAFCET como G0. Dado el objetivo del ejemplo, no nos interesa entrar en demasiados detalles del desarrollo de esta automatización básica. Mostramos tan sólo la secuenciación básica de operaciones, con el fin de poder concentrarnos en la parte que ahora nos interesa: cómo la guía GEMMA nos irá obligando a modificar este GRAFCET con el fin de obtener la coordinación deseada con otros GRAFCET.

En este punto, podemos decir que tenemos finalizada la primera fase, o fase de automatización, de aplicación de la guía GEMMA (aunque, tal como hemos dicho, no entraremos en este punto en los componentes más tecnológicos de esta fase). Los pasos siguientes son las fases de supervisión e interacción, en las que ya tenemos en cuenta las especificaciones completas sobre el funcionamiento de la máquina, así como las interacciones con el operario que sean necesarias; por consiguiente, el diseño del panel de mando.

## 5.2 Especificaciones de funcionamiento

Tal como se ha presentado en el capítulo 3, la aplicación de las fases de supervisión e interacción no son procesos independientes (figura 3.4). La consideración de los módulos a incluir y elementos necesarios del panel de operario) debe irse realizando en paralelo. De esta forma, presentaremos las especificaciones de funcionamiento y, a partir de este punto, iniciamos un proceso iterativo en el que iremos analizando los modos de funcionamiento necesarios y la modificación, si procede, del panel de operario.

Veamos ahora las especificaciones que se nos piden para la automatización de la máquina descrita. Estas especificaciones, como veremos, acaban siendo bastante típicas y usuales. De la misma forma, la manera en que la guía GEMMA nos permite implementarlas hace que, aunque nos encontremos ante un proceso diferente, los pasos a considerar, y hasta los GRAFCET de coordinación resultantes, acaben siendo muy similares (si no idénticos, en algunos casos).

Para la estación trituradora deseamos:

- Seleccionar el funcionamiento automático o ciclo-a-ciclo, mediante un selector y un pulsador de validación.
- Poder parar en el estado actual con un pulsador de pausa.
- Detectar cuando falten pastillas, en cuyo caso se avisará al operario y se parará la máquina a la espera de su reposición
- Considerar una parada de emergencia y un pulsador de rearme para volver al estado inicial una vez reparada la avería.

A partir de estas especificaciones, y de las consideraciones realizadas en el capítulo 3, identificamos, en una primera aproximación, la necesidad de incluir los módulos de seguridad y marcha (por consiguiente, los GRAFCET de seguridad y conducción).

En el panel de operario, tomaremos como situación inicial la resultante de las consideraciones hechas en los dos capítulos anteriores. En él se incluyen el conjunto básico de selectores, pulsadores e indicadores a tener en cuenta respecto a estos modos. Si como resultado del análisis de nuestro caso concreto precisamos alguna posibilidad de interacción adicional, la podremos añadir atendiendo a las consideraciones hechas sobre el diseño del panel de mando.

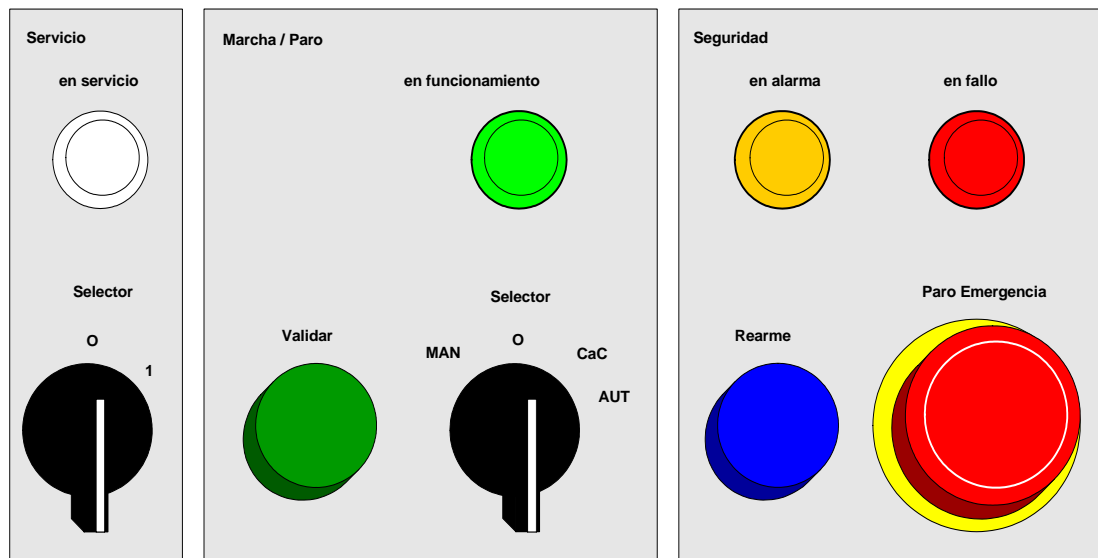


Fig. 5.4 Panel de mando. Propuesta al incluir los módulos de marcha/paro y seguridad

A partir de este punto, iremos aplicando la guía GEMMA especificación por especificación. Al considerar una especificación, tomaremos como punto de partida el resultado obtenido en la especificación anterior y, añadiremos las partes necesarias para la nueva especificación.

Para la implementación de cada una de las especificaciones analizaremos en primer lugar qué estados de la guía GEMMA precisamos.

En segundo lugar, traduciremos estos estados a los correspondientes estados GRAFCET teniendo en cuenta la dependencia de otros posibles GRAFCET ya diseñados. De esta forma, iremos construyendo el GRAFCET correspondiente a los módulos introducidos.

Evidentemente, a partir de los casos considerados en los dos capítulos anteriores, podríamos incluir directamente los GRAFCET allí obtenidos.

No obstante, con el fin de ejemplificar con más detalle la aplicación de los estados de GEMMA, así como su significado dentro del desarrollo de la automatización y ver cómo se coordinan los diferentes GRAFCET, procederemos a una aplicación paso a paso pero mostrando en cada momento el paralelismo con las consideraciones hechas en los capítulos anteriores.

### 5.3 Funcionamiento automático y ciclo-a-ciclo.

Para esta primera especificación, precisamos los estados *A1*, *A2* y *F1* de la guía GEMMA, y lo importante es cómo quedan determinadas las transiciones entre estos estados: mediante entradas provenientes del panel de operario.

Cada uno de los estados de la guía GEMMA que utilizemos se convertirá en un estado GRAFCET. De esta forma, al igual que en la sección 3.4.1, los estados de GEMMA y GRAFCET derivado quedarían como:

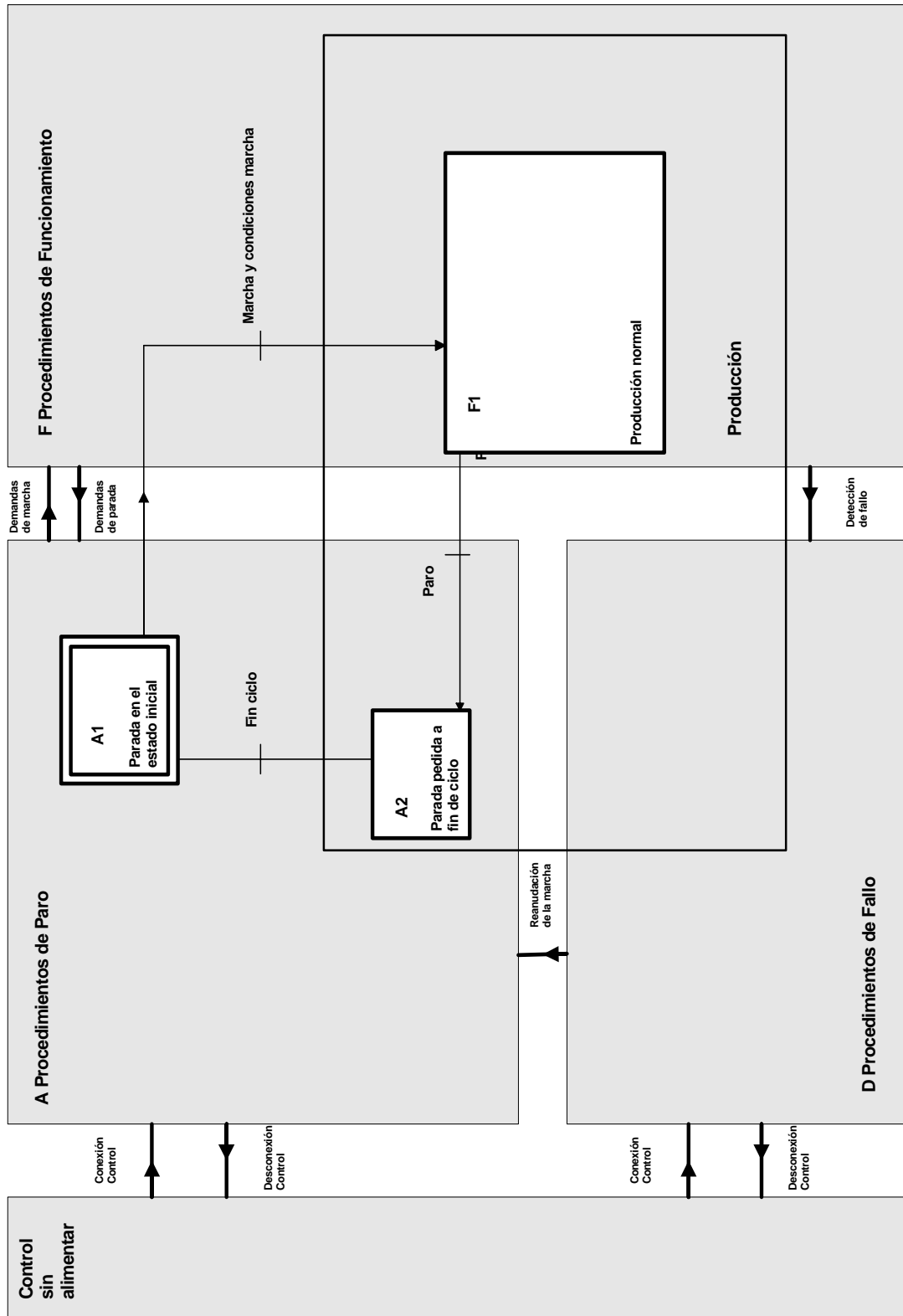
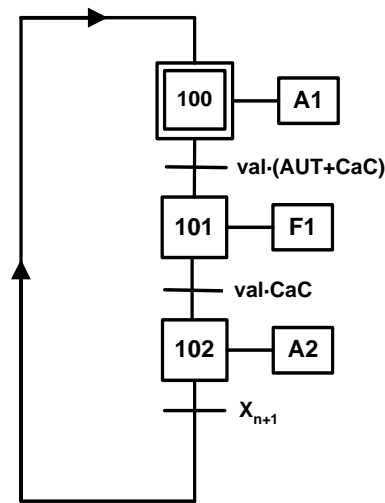
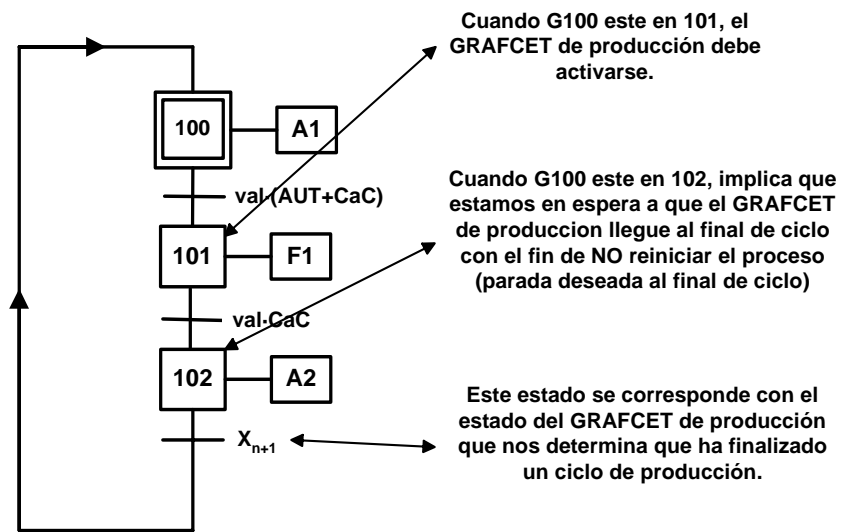


Fig. 5.5 GEMMA: Parada al final de ciclo



G100

Fig. 5.6 GRAFCET de conducción para la primera especificación



G100

Fig. 5.7 Interacción GRAFCET de conducción y de producción

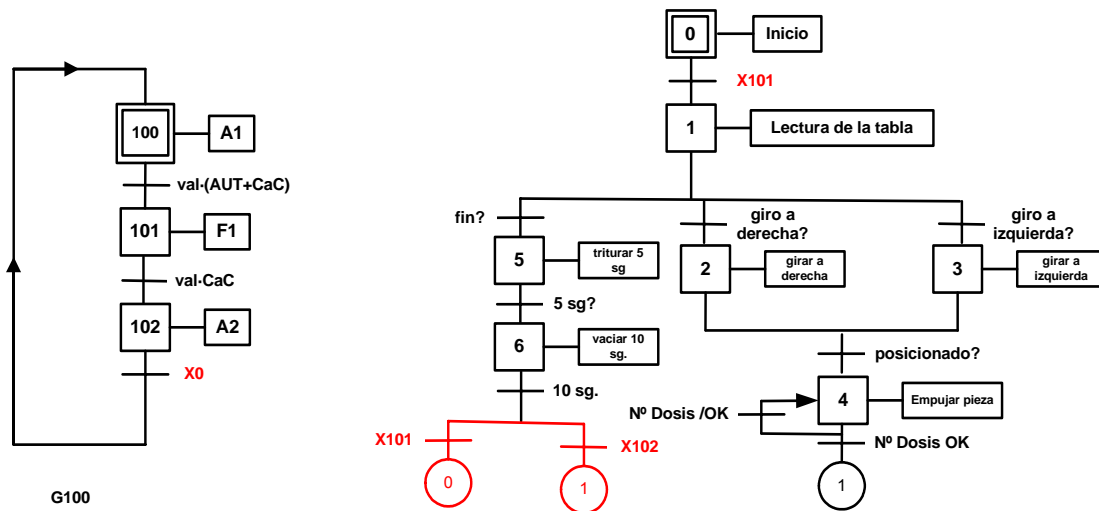


Fig. 5.8 Interacción entre GRAFCET de conducción y producción

¿Qué significado tiene el hecho de que G100 esté en un estado determinado? Cada uno de los estados de G100 expresan un estado determinado de funcionamiento o haber llegado a un punto específico del ciclo de producción. Por tanto, tener claro el significado de cada uno de los estados de G100 es vital para entender la interacción entre los correspondientes GRAFCET (en este caso, G100 y G0).

Vale la pena observar cómo está introducida la condición de *Fin ciclo*. Esta condición no depende del panel de operario sino de que el GRAFCET de producción llegue a un estado determinado al que asociaremos que la máquina ha finalizado un ciclo de producción. Vemos, pues, que hay una interacción entre G0 y G100 en ambos sentidos, pero de dos maneras diferentes.

- Los estados de G100 determinarán condiciones de ejecución (por tanto, transiciones) en G0
- Transiciones de G100 quedarán determinadas por estados de G0.

Esta dependencia implica que ahora debemos volver al GRAFCET de producción, G100, e introducir las consideraciones necesarias a fin de contemplar esta interacción (en definitiva, la determinación de los modos de ejecución).

Vemos que en G0, el GRAFCET de producción, hemos considerado, una vez realizada la trituración de las pastillas y su expulsión, dos maneras diferentes de continuar que vendrán determinadas por el estado en que se encuentre G100, el GRAFCET de conducción.

- Si G100 está en el estado 101, X101 es cierto; entonces, volvemos al estado 1, ya que es indicativo de que estamos en funcionamiento automático.
- Si G100 está en el estado 102, X102 es cierto; entonces, volvemos al estado 0, ya que es indicativo de que estamos en funcionamiento ciclo-a-ciclo. Luego, desde el estado 0, el GRAFCET no evolucionará, a menos que desde el GRAFCET de conducción se dé paso a funcionamiento.
- La transición de fin de ciclo de G100 queda así determinada por el hecho de que el GRAFCET de producción se encuentre en el estado 0; x0 es cierto.

Este sería el resultado de esta primera etapa de aplicación de la guía GEMMA: Un nuevo GRAFCET, G100, y una modificación del GRAFCET que teníamos anteriormente, el de producción o G0.

Respecto al panel de mando, fijémonos que la intervención del usuario necesaria queda cubierta por la propuesta inicial realizada. En efecto, el panel propuesto es el resultado de las consideraciones hechas en los capítulos anteriores respecto a los modos de mando y seguridad. De esta forma, hay partes del panel de mando que aún no han sido utilizadas pero que irán apareciendo a medida que vayamos considerando el resto de especificaciones. De igual forma, es posible que para alguna especificación sea preciso añadir algún componente.

#### 5.4 Parada en el estado actual

En este caso, queremos implementar la posibilidad de parar la máquina en un posible estado de funcionamiento, dentro de un ciclo, mediante la pulsación del botón de pausa. La máquina permanecerá parada en el estado hasta que volvamos a validar la continuación de la marcha.

Notemos que el caso tratado en el punto anterior (parada a fin de ciclo) es un caso muy concreto de éste. Conviene también aclarar qué se entiende por estado de funcionamiento. No se debe confundir con cada uno de los estados GRAFCET de G0. Lo que debemos hacer es identificar posibles puntos de parada dentro del ciclo de funcionamiento de la máquina, la ejecución de uno de estos pasos puede necesitar varios estados GRAFCET. Por ejemplo, en este caso en que podríamos establecer como puntos de parada:

- Después de realizar una lectura de la tabla de datos de entrada.
- Después de haber posicionado el dispensador.
- Después de haber empujado la cantidad deseada de piezas.
- Después de haber triturado la mezcla.
- Después de haber vaciado la mezcla triturada.

Posiblemente haya más puntos posibles de parada. Precisamente este hecho pone de manifiesto que son puntos que se escogen a partir de la secuenciación a realizar por la máquina y que es una decisión a tomar en el momento de establecer el detalle de las especificaciones.

Una vez tenemos establecidos todos los puntos de parada, vemos que podemos establecer la parada en los mismos de dos maneras diferentes:

- Como una petición puntual en un instante determinado.
- Como la ejecución del ciclo de funcionamiento ante un modo de verificación con orden. Es decir, la máquina irá avanzando y, en cada uno de los puntos de parada establecidos, esperará la intervención del operario para verificar el avance al siguiente.

Veremos que pueden considerarse ambas opciones de una manera muy sencilla. Empezaremos analizando la parada a partir de una petición puntual en un instante determinado.

Partiremos, pues, de los estados GEMMA utilizados para la especificación anterior y añadiremos los estados correspondientes a la gestión de una parada solicitada en un estado determinado.

En la Figura podemos ver como hemos completado el diagrama GEMMA añadiendo nuevos estados. Estos estados reúnen la posible pulsación del pulsador de parada y conducen al diagrama al estado A3.

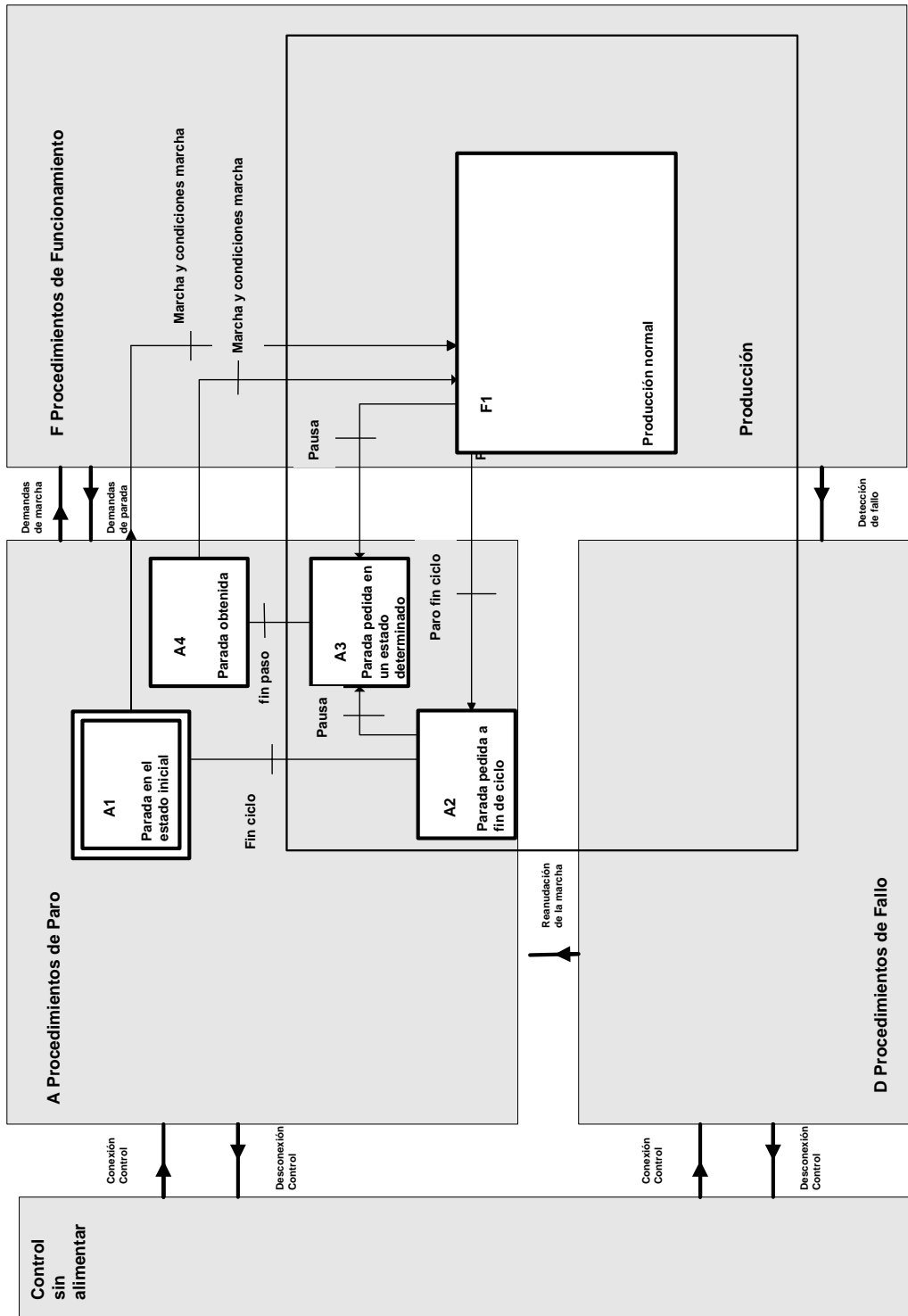


Fig. 5.9 Estados GEMMA, parada solicitada en un estado determinado

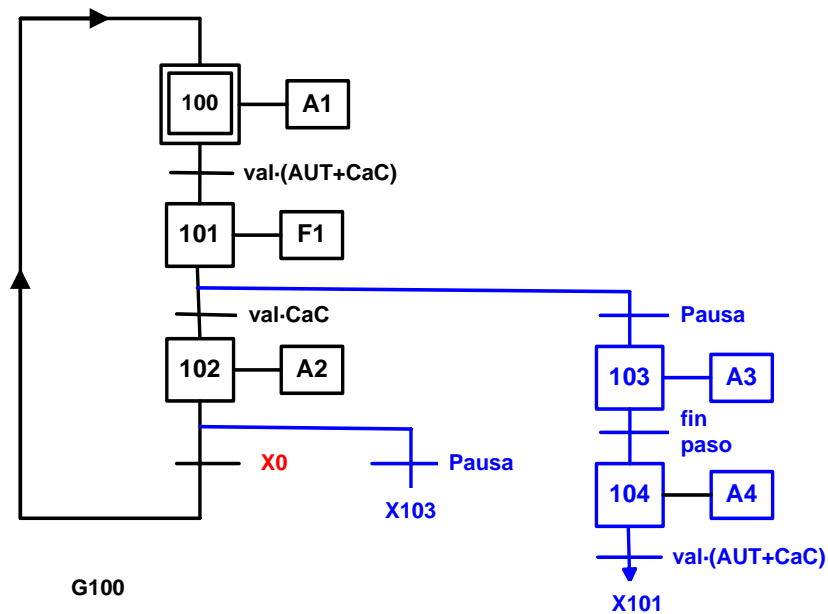


Fig. 5.10 GRAFCET de conducción y estados GEMMA

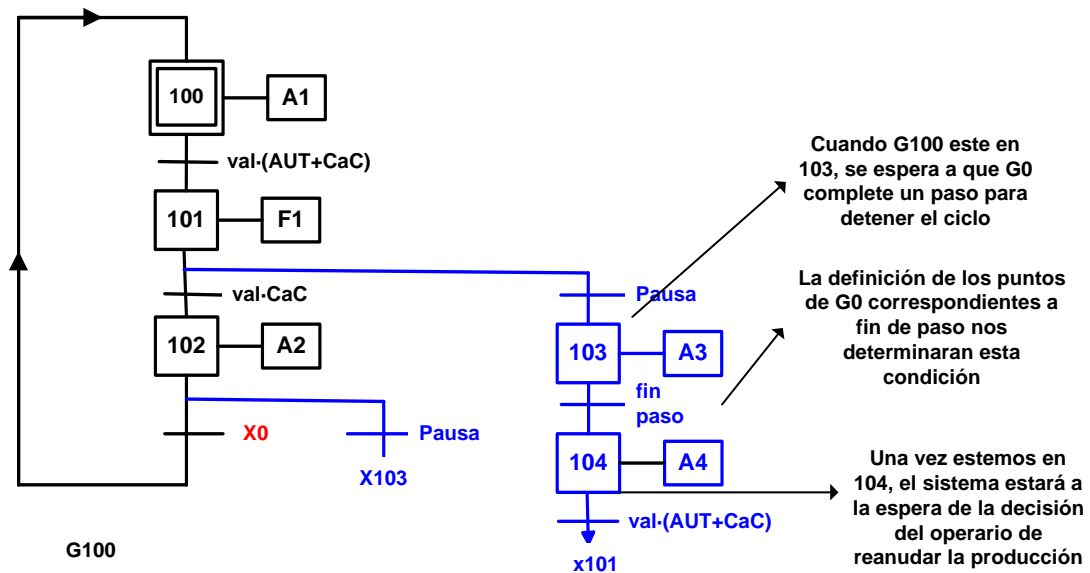


Fig. 5.11 Interacción entre los GRAFCET de conducción y producción

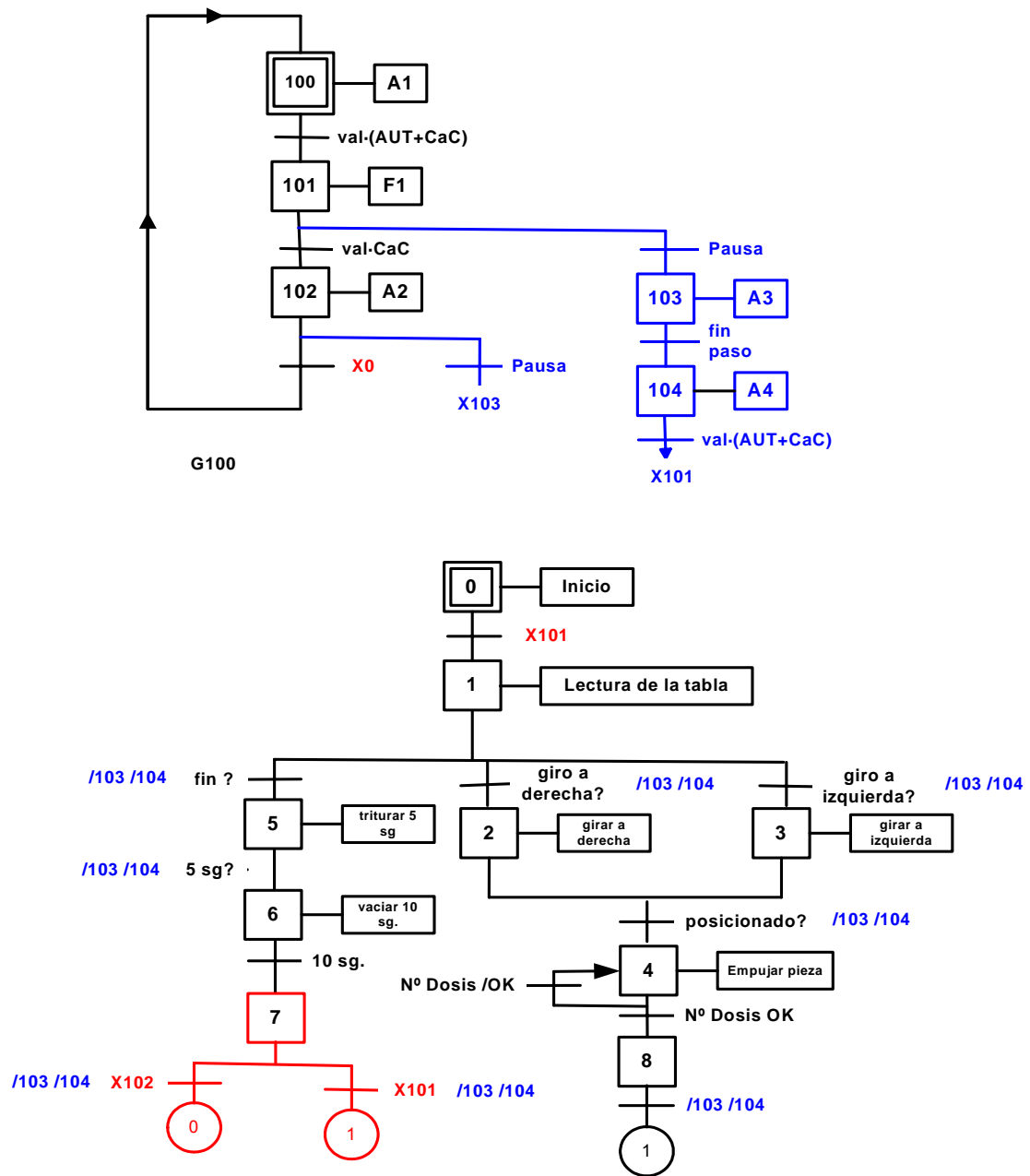


Fig. 5.12 GRAFCET de producción y conducción, con parada solicitada en un estado determinado

Debido a que es posible que la máquina no pueda parar instantáneamente en el momento de pulsar pausa, tenemos este estado *A3* que esperará hasta que la máquina llegue a completar la tarea que define el paso o estado actual. Una vez terminado el paso la máquina se deberá detener. Esto lo tenemos representado mediante la presencia del estado *A4*, estado en el que permanecerá hasta que no se valide de nuevo la marcha de la operación y se provoque el retorno a la operación normal o *FI*.

¿Como traducimos esta ampliación de los estados GEMMA a GRAFCET? Lo que haremos es algo similar a lo hecho con los estados de GEMMA, es decir, ampliar el GRAFCET de conducción que teníamos en la fase anterior (fig. 5.10).

Como vemos, al igual que en la especificación anterior, cada estado GEMMA nos determina un estado del GRAFCET.

Si en la especificación anterior teníamos una condición de fin de ciclo, en este caso tenemos la correspondiente a fin de paso. ¿Qué significado tiene esta condición? Claramente, si estamos imponiendo como especificación de funcionamiento de nuestra máquina la posibilidad de pararse en un estado determinado, esto implica que existan, dentro de un ciclo de producción, unos estados definidos. Podríamos interpretarlo como las diferentes etapas en que podemos dividir el ciclo de producción, de manera que al final de cada una de estas etapas es posible detener la máquina antes de que pase a la siguiente. Estos puntos de parada serán los que determinarán la condición de transición Fin de paso.

Veamos cómo queda planteada, pues, la interacción entre el GRAFCET de conducción y el de producción, una vez añadidos estos nuevos estados (fig. 5.11).

Así pues, ahora sería el momento de retomar el GRAFCET de producción y, en los puntos que nosotros asociemos a un fin de paso, en que la máquina ha completado una etapa o estado de funcionamiento, introducir en la correspondiente transición, la condición de que el GRAFCET de conducción no se encuentre ni en 103 ni en 104 (es decir, no esté esperando a que se complete el paso, ni esté en estado de espera después de completarse el paso). Por tanto, en estos puntos del G0, el GRAFCET podrá continuar evolucionando en caso de que ni x103 ni x104 sean ciertos.

Los GRAFCET quedarían tal como se ilustra en la fig. 5.12.

¿Cómo quedaría especificada la transición etiquetada como “Fin paso” en G100? Sería un buen ejercicio que, a partir de cómo está el GRAFCET de producción, G0, el lector intentase determinar cuál sería esta condición. ¿Cómo la escribiríamos a partir de los estados de G0?<sup>1</sup>

¿Cómo solicita el operario una parada? Para esto tenemos que remitirnos al panel de mando. Vemos que en la propuesta hecha al inicio del ejemplo no hay ningún pulsador de pausa. No obstante, tenemos en el selector de modos de marcha la opción MAN. Podemos utilizar este modo para indicar que el operario pasa a supervisar manualmente el funcionamiento de la máquina, haciendo que ésta se detenga al finalizar el paso. Una vez G100 se haya situado en el estado 104, volviendo a situar el selector en la posición AUT o CaC salimos de la pausa y el ciclo continua. De esta forma, la receptividad que tenemos en G100 identificada como pausa debería quedar como se ilustra en la fig. 5.13.

---

<sup>1</sup> Nótese que esta condición se construirá como una suma lógica determinada por los estados correspondientes del GRAFCET de producción.

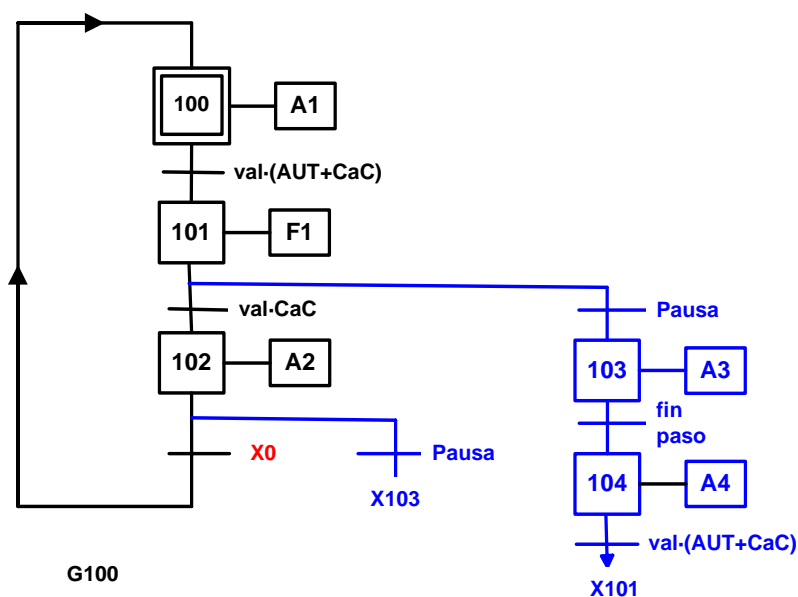


Fig. 5.13 GRAFCET de conducción que incluye parada en un estado determinado

Hemos comentado anteriormente que otra posible realización de estas paradas se realiza según un modo de marcha de verificación con orden. De esta forma, lo que estaremos indicando es que queremos realizar *todas* las paradas existentes a lo largo del ciclo de producción, y no tan sólo la correspondiente al instante en que solicitamos la pausa (obviamente, al igual que en el caso anterior, en un estadio cualquiera del ciclo podremos volver a modo automático). Veamos cómo incluiríamos este modo a partir de lo desarrollado hasta el momento.

Añadimos, en primer lugar, los estados correspondientes de la guía GEMMA (en este caso, F5).

Este estado nos añadirá el consiguiente estado en G100, como un modo de funcionamiento adicional, el cual consideraremos según se ha tratado en el capítulo 3: Incluir un selector de verificación y tener el selector de marcha en modo MAN y el de verificación en posición *orden*.

Avancemos aquí, antes de dibujar la modificación del GRAFCET de producción, G100, que esto nos obligará a revisar la manera en que accedíamos a la pausa en el caso tratado más arriba y, si procede, a cambiarla.

De momento, incluimos en el panel de operario el selector correspondiente al modo de verificación, junto con el pulsador para verificar la etapa y su indicador (fig. 5.15).

De esta forma, cuando el selector de marcha/parado esté en la posición MAN, es este nuevo selector de verificación el que determina de qué manera entra el operario a interactuar con la automatización. Tenemos dos opciones:

- Selector de verificación en orden: Indica que el operario desea ejecutar el ciclo de producción parando en cada etapa. Cada una de estas etapas deberá ser verificada antes de avanzar a la siguiente.
- Selector de verificación en 0: Con el selector de marcha/parado situado en MAN, indica que el operario desea realizar una pausa puntual.

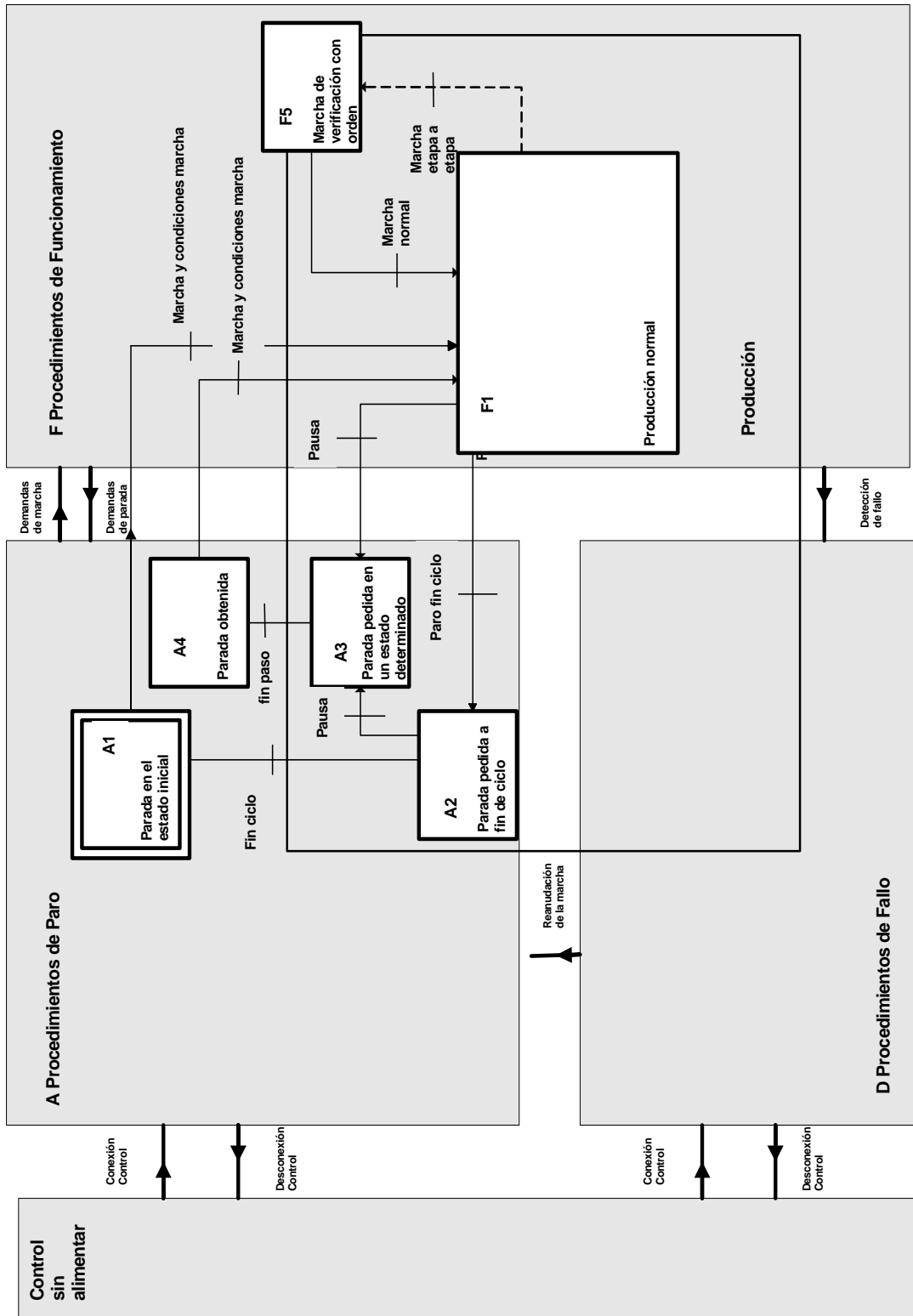


Fig. 5.14 GEMMA incluyendo estados de verificación con orden

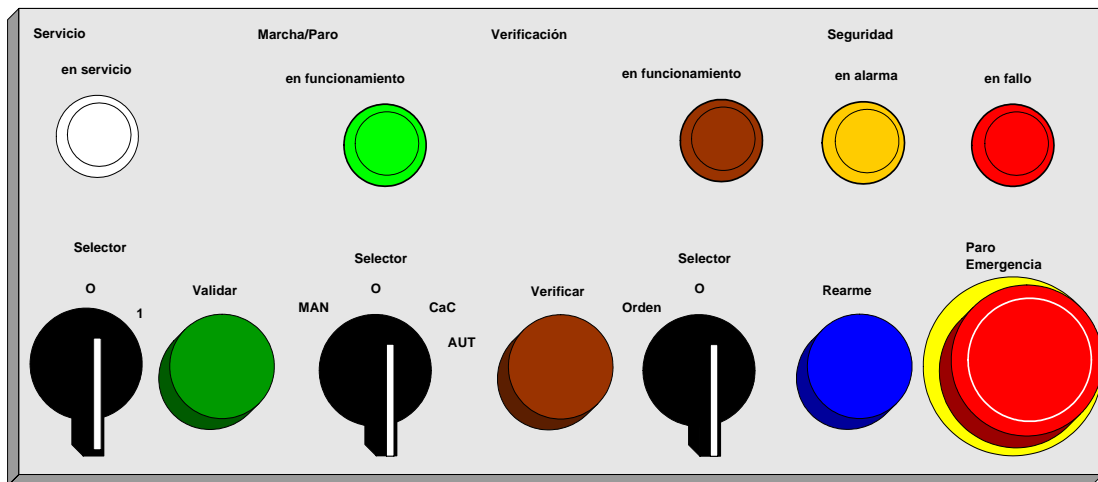


Fig. 5.15 Panel de mando que incorpora el selector de modos manual

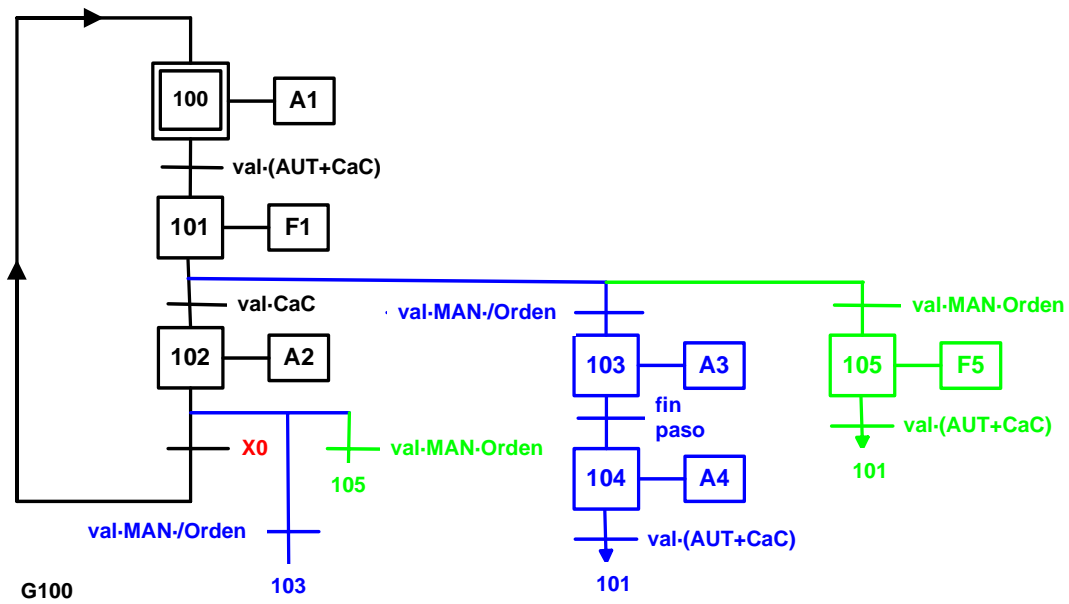


Fig. 5.16 GRAFCET de conducción que incorpora modo manual

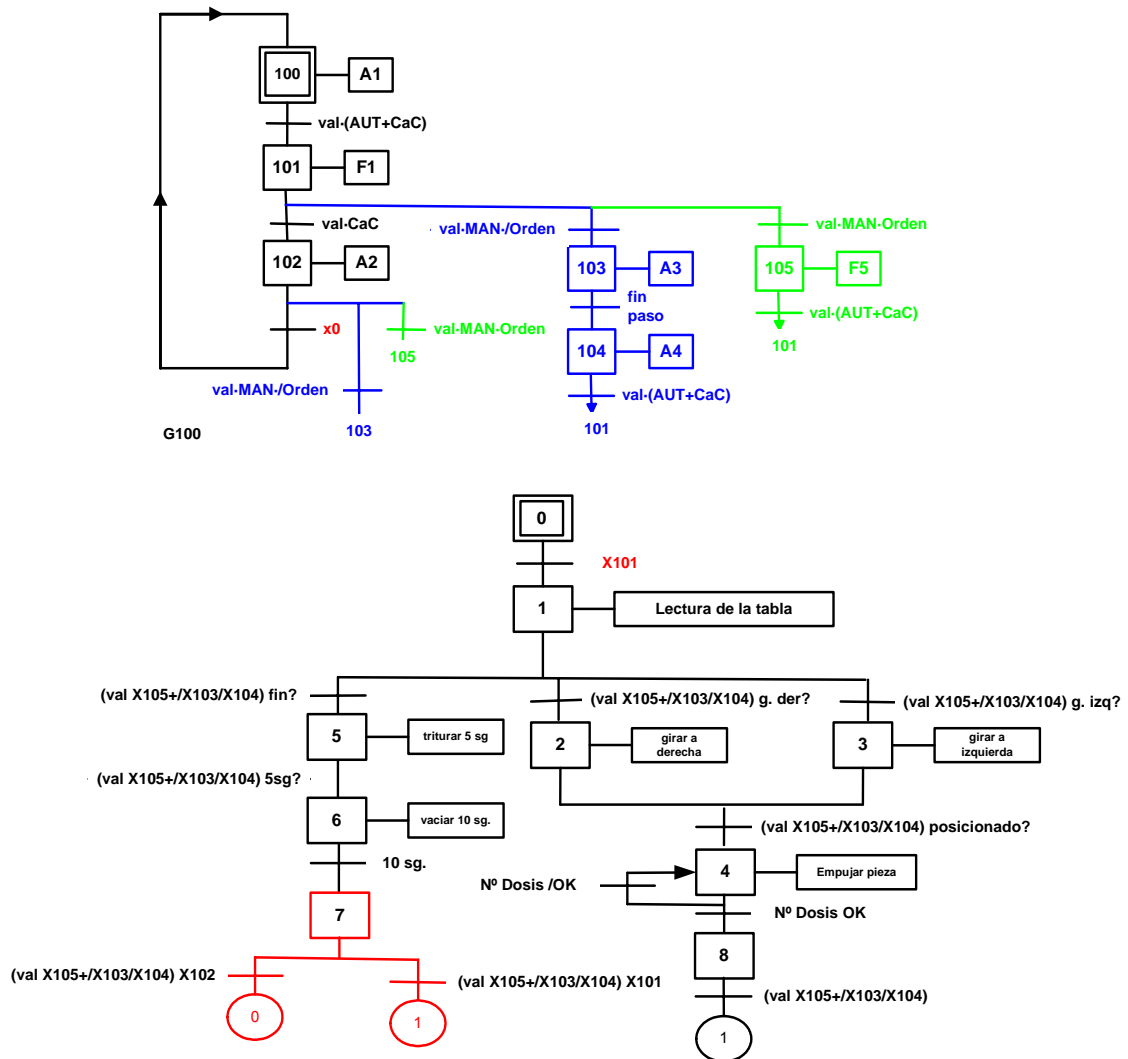


Fig. 5.17 Interacción entre los GRAFCET de conducción y producción

El GRAFCET de conducción, G100, quedaría de la forma indicada en la fig. 5.16.

De esta forma, tan solo hemos tenido que modificar la receptividad que nos llevaba a 103, que pasa de *val·MAN* a *val·MAN/Orden*.

Ahora tenemos que incluir esta nueva posibilidad de ejecución del ciclo de producción en el GRAFCET de producción, G0: deberemos incluir, en la receptividad existente, la verificación de la etapa como condición para poder avanzar a la siguiente.

### 5.5 Detección de falta de producto

Con esta especificación estamos ante una situación de defecto. Una situación de defecto, no obstante, en la que al operario se le solicita reponer producto para así poder proseguir la marcha.

Vamos, pues, a completar el diagrama GEMMA que tenemos hasta el momento, añadiendo los estados necesarios para tratar esta situación. ¿Qué deberán considerar los estados a añadir? Básicamente, la secuencia de acciones en esta situación de defecto consiste en:

- Detectar que faltan piezas
- Esperar la reposición de piezas
- Llevar el sistema a la espera de que se reactive otra vez el funcionamiento normal.

Observamos, por tanto, que no estamos ante una situación en la que podamos producir a pesar del defecto: si no hay piezas en un dispensador, lo que hacemos es interrumpir el ciclo de producción para que el operario realice la reposición. Una vez repuesto el defecto (se ha hecho el diagnóstico y tratamiento del defecto), debemos reanudar el ciclo. Veamos primero los estados GEMMA correspondientes, junto con su significado, y, luego, cómo se incorporarían a los que tenemos hasta el momento, conformando el diagrama GEMMA completo de nuestra aplicación (fig 5.18).

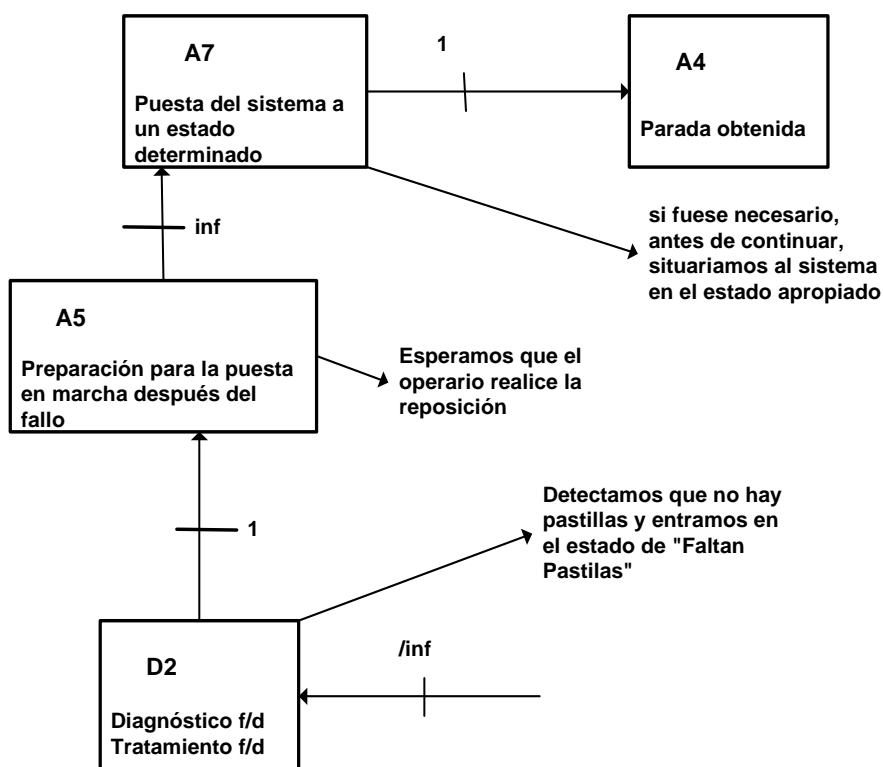


Fig. 5.18 Estados GEMMA para una situación de defecto

Observemos que dos de las transiciones las tenemos etiquetadas con un '1'. Con esto indicamos, sencillamente, que no nos quedaremos en el estado precedente. Tan pronto como se detecte que no hay pastillas (entramos en D2), saldremos y pasaremos a esperar que el operario las reponga (estado A5). De manera similar con la otra situación. Ésta es, sin embargo, la situación particular del ejemplo que nos ocupa. Ante la previsión de varios defectos posibles asociados a D2, tendríamos la correspondiente etapa de diagnóstico (en este caso, inmediata, ya que hay una única posibilidad). Siguiendo con la modularidad GEMMA, esta etapa se realizaría activando el GRAFCET correspondiente.



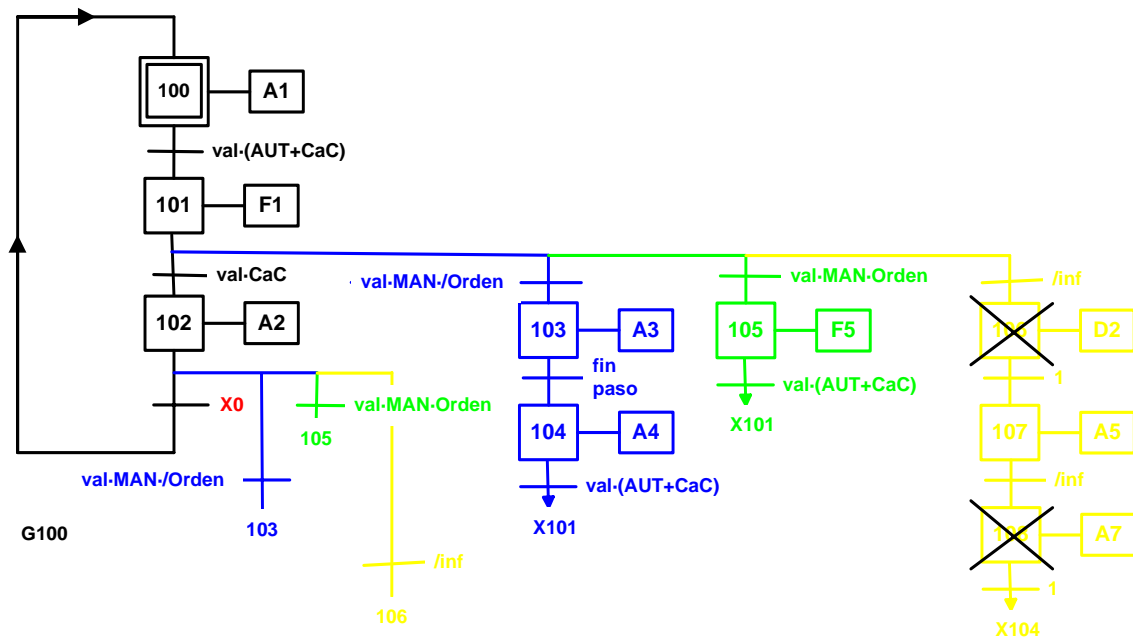


Fig. 5.20 GRAFCET de conducción que incorpora la situación de defecto

Repitiendo de nuevo la operación, ahora tenemos que asociar a estos estados GEMMA los correspondientes estados GRAFCET y aumentar con ellos el GRAFCET de conducción.

Vemos que, a nivel de GRAFCET, podemos eliminar los estados que llevan asociada una transición inmediata. De esta forma, tan sólo tendríamos el estado 107, del que saldríamos tan pronto se detectara que ya se ha repuesto producto. Cuando salgamos de este estado, ¿a qué estado dirigimos el GRAFCET? Fijémonos que, en cuanto a GEMMA, el diagrama evolucionaba al estado A4. Así pues, el GRAFCET lo debemos dirigir al estado asociado: 104.

Veamos cómo queda afectado el GRAFCET de producción por este nuevo estado añadido a G100. Tendremos que modificar las receptividades asociadas a los estados del GRACET de producción que van añadiendo las unidades de producto. Fijémonos en la manera en que se realiza esta modificación (fig. 5.21).

## 5.6 Consideración de una parada de emergencia

La consideración de una parada de emergencia y el rearme posterior de la máquina es una especificación de inclusión obligada en cualquier automatización.

Con ella lo que incluimos es la monitorización de la llamada “seta” de emergencia, que debe parar el sistema y llevarlo a un estado de espera en el cual el operario debe reconocer que se ha producido una alarma y desde el cual no se puede volver a poner la máquina en operación a menos que el operario realice el rearme de la misma. Este *protocolo* de cumplimiento obligado nos asegura que la máquina no puede volver a entrar en producción sin que antes no se hayan reparado las partes defectuosas o solucionado el error que la emergencia ha provocado.

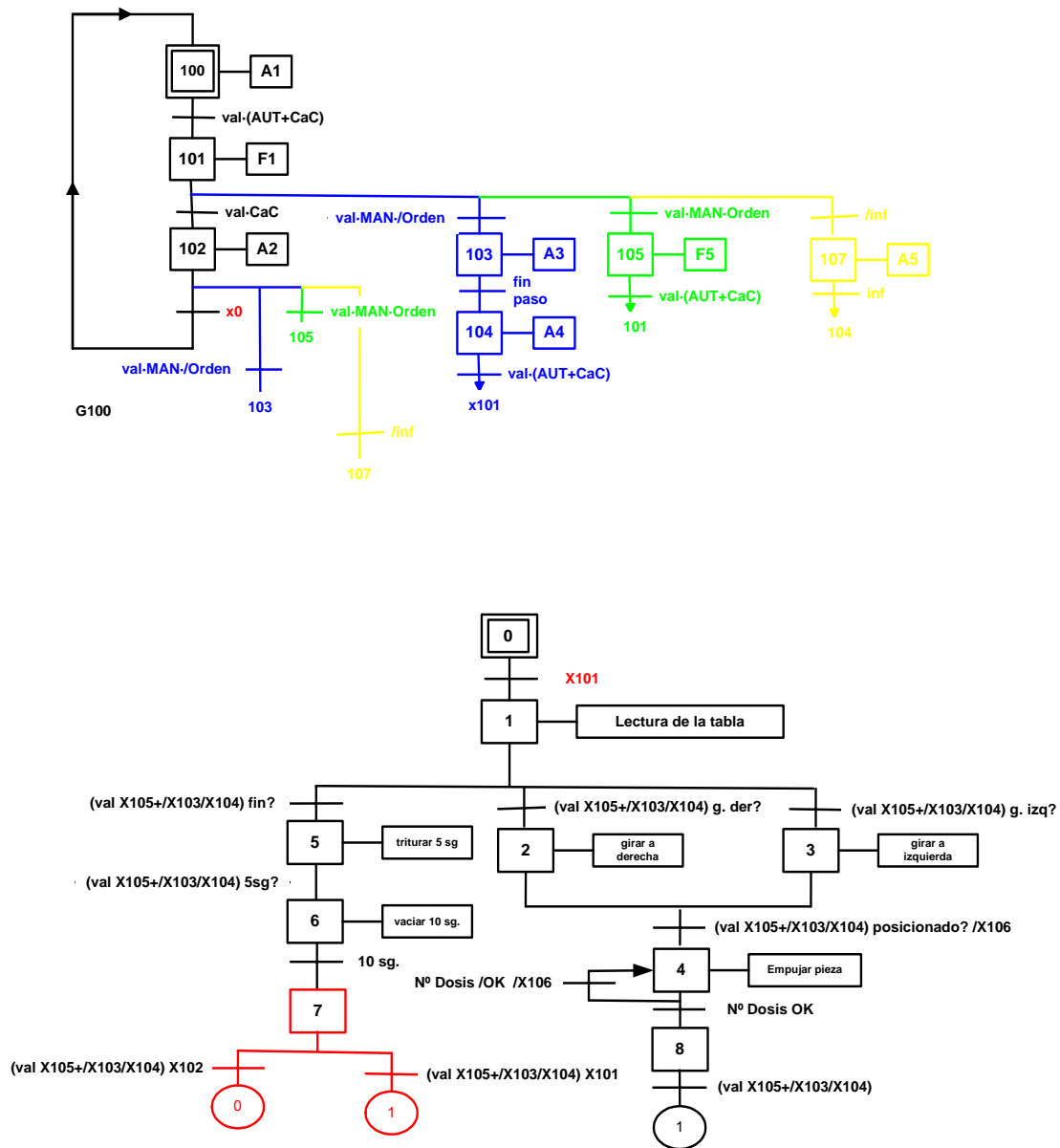


Fig. 5.21 Interacción entre los GRAFCET de conducción y producción en caso de defecto

Puesto que estas situaciones de gestionar la parada de emergencia y el rearme son de importancia vital, se acostumbran a implementar en GRAFCET separados de los anteriores. Tendremos, pues:

- GRAFCET de seguridad G20
- GRAFCET de rearme G70

Recordemos también, del capítulo 4, que se incluye la posibilidad de un GRAFCET adicional para llevar el sistema después del rearme, a las condiciones iniciales que nos permitan iniciar el ciclo de producción de nuevo. En nuestro caso, consideraremos que esta puesta en inicio ya la realizamos en el GRAFCET de rearme –fijémonos, de hecho, que ambos GRAFCET tienen una ejecución totalmente

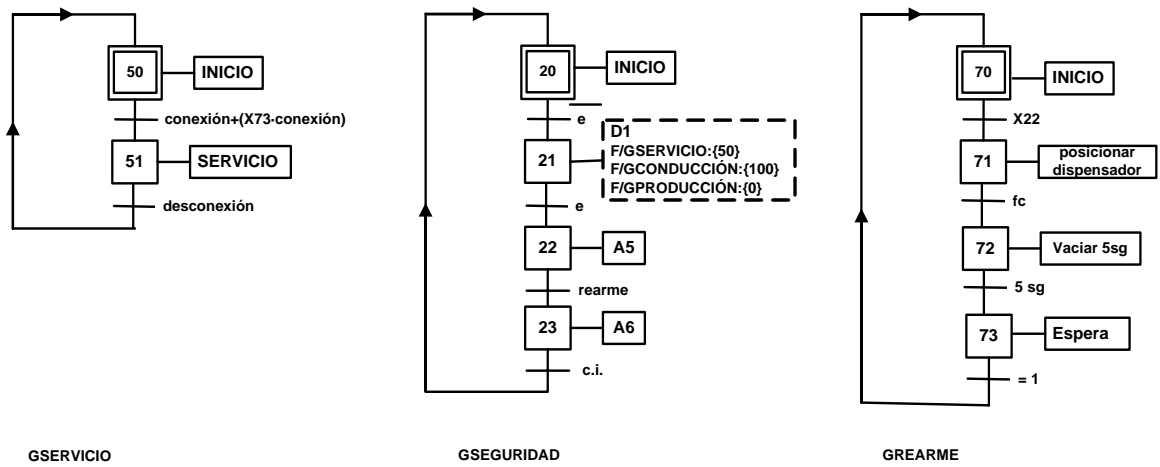


Fig. 5.22 GRAFCET de seguridad

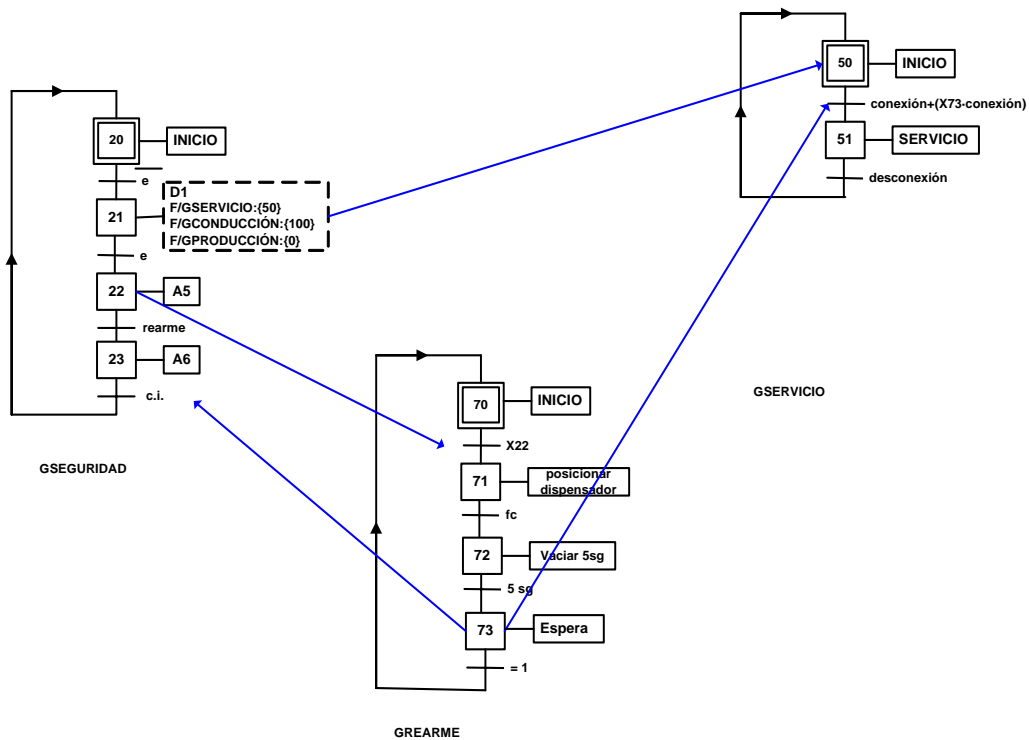


Fig. 5.23 Interacción entre los GRAFCET de seguridad y rearme

secuencial y su división obedece a razones de modularidad que facilitan la visibilidad del sistema completo-. El GRAFCET que sí tendremos que añadir, no considerado hasta el momento, es el GRAFCET de servicio, que gestiona el estado de servicio de la máquina.

Fijémonos que estos GRAFCET los hemos obtenido a partir de los genéricos propuestos en el capítulo anterior casi de forma inmediata.

Por supuesto que estos GRAFCET interactúan en el sentido que la petición de rearme se realiza desde el GRAFCET de seguridad y, una vez finalizada la operación de rearme, éste puede volver a entrar en servicio. Las dependencias entre ambos GRAFCET quedarían como se ilustra en la fig. 5.23.

Para finalizar las consideraciones de esta última especificación, debe tenerse en cuenta que, en el GRAFCET de conducción, debemos añadir la disponibilidad de servicio a fin de que éste pueda evolucionar desde el estado inicial y entrar en producción. El estado que nos marca la disponibilidad de servicio es el 51.

De esta manera, pues, la aplicación final consiste de cinco GRAFCET que interactúan entre ellos, coordinándose (fig. 5.25). Tenemos el GRAFCET de conducción, G100, que sería el que gobernaría la ejecución de la aplicación, los modos de funcionamiento, etc., y determinaría el avance de G0. Por otra parte, tenemos G20, G50 y G70, que actuarán en caso de que se de una situación de emergencia y para gobernar la puesta en servicio y desconexión.

Ahora podríamos proceder a implementar cada uno de estos GRAFCET en el autómata correspondiente. Vemos, pues, que la guía GEMMA nos independiza totalmente de la tecnología a utilizar y que lo que establece es una metodología para tener en cuenta las diferentes posibles situaciones en el desarrollo de una automatización.

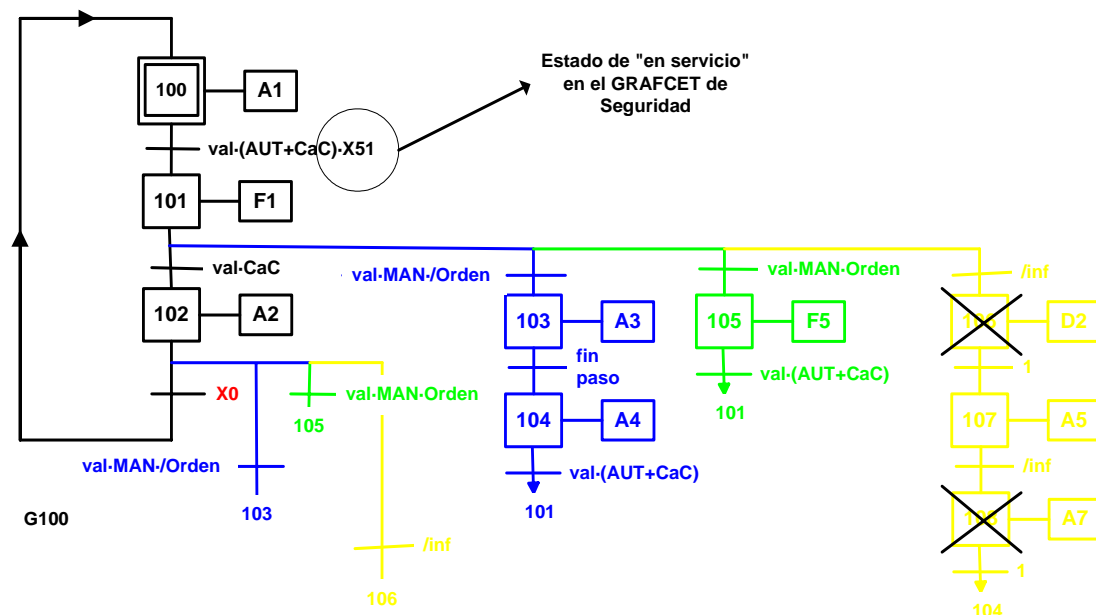


Fig. 5.24 Disponibilidad de servicio en el GRAFCET de conducción

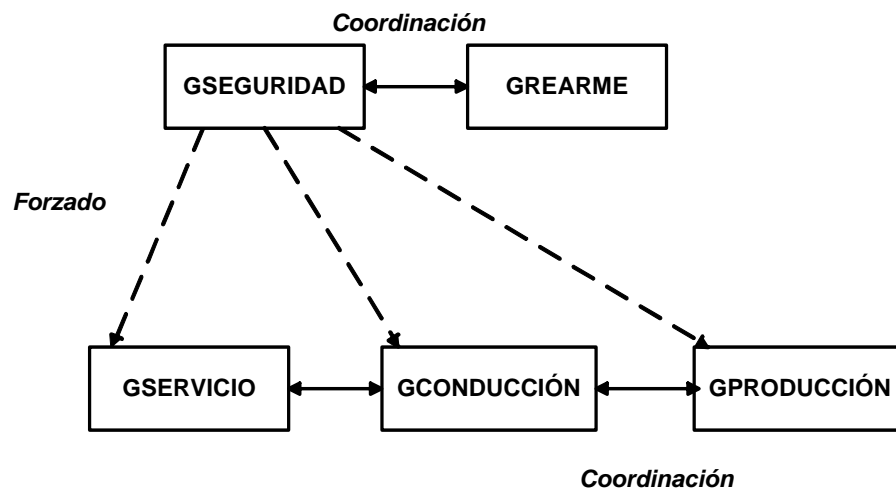


Fig. 5.25 Conexión final entre GRAFCET

## 6. Conclusiones

Para finalizar el desarrollo realizado, cabe recordar los comentarios incluidos en la presentación. Este libro propone un salto cualitativo mediante el desarrollo sistemático de la guía GEMMA como metodología de uso genérico a utilizar para cubrir aspectos de supervisión y automatización. El enfoque planteado es complementario al que se ofrecen en otras obras de automatización.

Es evidente que el experto en automatización debe combinar los conocimientos teóricos con la aplicación práctica de los mismos, y en esta área del conocimiento ello es difícil debido al cambio tecnológico progresivo que conduce a una formación continuada a lo largo de la vida profesional.

El libro empieza por un capítulo de introducción donde se describen los fundamentos básicos de la automatización industrial. A continuación se procede a la descripción funcional y tecnológica del GRAFCET, ya que en estos momentos esta herramienta es comúnmente aceptada para la representación del control secuencial de forma independiente al uso concreto de la programación del automatismo.

En el momento de introducir la guía GEMMA, se ha hecho especial hincapié en presentar los aspectos básicos (metodología, representación, escenificación de situaciones elementales) y proceder posteriormente a aspectos más avanzados (GRAFCET de seguridad, coordinación horizontal de GRAFCET subordinada a la jerarquía establecida mediante forzado). Después de aprender los conceptos, intentar aplicarlos y reflexionar sobre ellos se llega a la conclusión de la importancia del trabajo cooperativo entre usuarios para conseguir un uso riguroso de la guía. La cooperación continua entre usuarios permite, de forma iterativa, introducir aspectos de mejora que tienden a alejarse de las interpretaciones subjetivas de un solo usuario y acercarse a una metodología provechosa de ámbito genérico.

Respecto a la parte práctica de la utilización de la guía GEMMA, no se ha pretendido crear un libro de problemas didácticos simplificados pero sí se ha querido destacar un escenario industrial en el que la guía y el experto en automatización pueden desarrollar toda su potencialidad. Es el escenario ilustrado de la planta de la empresa Pirelli Cable que amablemente nos ha permitido ilustrar algunos conceptos.

A continuación, se presenta un caso detallado a modo de ejemplo que ilustre paso a paso cómo se puede aplicar la guía sobre un proceso.

Algunos aspectos presentes en la metodología han permitido reflexionar sobre el carácter multidisciplinario que se presenta en la guía GEMMA al confluir no tan sólo la automatización industrial, sino además la supervisión humana, el control tolerante a fallos, la prevención de riesgos laborales y la interacción persona-máquina. Sin pretender abordar cada una de estas dimensiones, que llevarían a un completo ejercicio de ingeniería de sistemas, se ha incidido en la interacción persona-máquina para ofrecer un panel de mando diseñado rigurosamente para adecuar la intervención del operario sobre procesos gobernados por automatismo (controlador lógico programable) y en el que

hemos corregido el programa base para añadirle los módulos especificados mediante la guía GEMMA. Este aspecto ofrece grandes posibilidades de tratarse con más detenimiento y de ahí que en el libro se le dedique un anexo (anexo A).

## **Discusión**

Desde el nacimiento de GRAFCET y la guía GEMMA por ADEPA se han desarrollado, en el ámbito teórico, formalismos estrictos sobre control tolerante a fallos, arquitecturas de supervisión humanas o artificiales, metodologías para el mantenimiento de sistemas productivos, mejora de las normas de seguridad en máquinas y en definitiva el cambio tecnológico que influye en la interacción entre operario y máquina.

Con estas ideas, los autores quieren hacer hincapié en que algunos de los estados representados de forma puntual como modos de la guía encierran otras disciplinas que convendría tener presentes para realzar la guía GEMMA y prepararla definitivamente para su salto a la normativa internacional. En este libro no se resuelve este detalle, pero los autores valoran que la guía GEMMA es un instrumento docente importante que puede ser útil tanto en la formación universitaria como en la aplicación sistemática de procedimientos rigurosos en sistemas automatizados complejos.

Desde estas líneas, los autores quieren ayudar a la difusión de la guía GEMMA como herramienta de trabajo útil para profesionales y docentes de la automatización desde un punto de vista de integración de disciplinas.

Tras muchas deliberaciones sobre la representación gráfica de la guía GEMMA, se propone en el anexo B una posible reorganización de los estados de la guía para facilitar la comprensión de la misma y su relectura que puede favorecer un debate sobre posibles mejoras de la guía GEMMA.

## Anexo A. Diseño del panel de mando

La automatización industrial es una materia en la que los continuos avances tecnológicos en electrónica, programación y diseño de nuevas aplicaciones industriales plantean grandes retos en la integración de procesos, productos y recursos. A mediados de los años ochenta, la filosofía CIM se planteaba como una metodología de integración de sistemas, desde el punto de vista de componentes, controladores, arquitecturas físicas de ordenadores, redes de comunicaciones y flujo de información de la planta, hasta el nivel de planificación o viceversa.

En los últimos años, se ha acuñado el nombre de automatización integrada mediante sistemas abiertos con la finalidad de facilitar al cliente la integración de equipos de distintas casas comerciales. Las arquitecturas abiertas se han ido extendiendo, desde la robótica, las comunicaciones industriales, los autómatas programables y las máquinas herramienta CNC, con resultados desiguales, y éste es un proceso dinámico aún no finalizado.

En estos momentos, se discute la necesidad de generar estándares *de facto*, en las especificaciones de comunicaciones de alto nivel en las aplicaciones SCADA, o en la programación de autómatas programables mediante normas internacionales como la IEC 1113-3.

Este proceso dinámico inacabado también es aplicable en el caso del panel de mando, y un problema abierto es la creación de especificaciones genéricas para el diseño y la utilización de paneles de mando. El panel de mando forma parte del conjunto de dispositivos HMI, interfaces persona-máquina presentes en sistemas de automatización industrial (terminales programables, monitor con pantalla táctil, botonera de programación, terminal móvil en supervisión de plantas industriales). La diversidad de dispositivos existentes se debe a la gran variedad de máquinas y procesos que se aglutinan bajo la denominación *sistemas de automatización industrial*.

En este anexo se presenta la integración de diversas áreas como la ergonomía, la ingeniería de la usabilidad y la normativa de seguridad en máquinas, para el diseño de un panel de mando en el que el operario pueda llevar a cabo la fase de intervención presente en la guía GEMMA.

### Especificaciones

En el capítulo 3 se demuestra cómo la guía GEMMA incide en el diseño del panel de mando en la fase de intervención. Actualmente, hay una gran diversidad de paneles, tanto en el ámbito académico como en el industrial. En el ámbito académico, algunos fabricantes de sistemas automatizados didácticos ofrecen un panel de mando simplificado basado exclusivamente en funciones básicas de marcha/paro



Fig. A.1 Panel de mando académico únicamente formado por controladores sin la presencia de dispositivos informativos visuales DIV

y parada de emergencia. Este tipo de panel permite implementar algunos casos de la guía GEMMA pero presenta la limitación de no ofrecer un panel completo, y, en determinadas situaciones, algunos controladores son utilizados con finalidades distintas, según sea la situación que hay que tratar.

En el ámbito industrial, se encuentran paneles básicos a pie de máquina o mediante soporte a la altura de los ojos del operario. Si la máquina incorpora diversos componentes periféricos, es fácil encontrar diversos paneles que incorporan pulsadores y selectores a lo largo de la máquina, como por ejemplo para poner en marcha una cinta transportadora, para accionar una subestación de montaje o para dirigir las actividades de una máquina-herramienta de CNC, por ejemplo.

Los paneles con soporte vertical situados en el campo visual del operario incluyen más elementos, como por ejemplo pulsadores con LED indicador incorporado, selectores de modo de funcionamiento, o bien diversos LEDs indicadores informativos del estado de funcionamiento de componentes de la máquina. En algunos casos, el panel se complementa con balizas de señalización representadas por columnas de LEDs en forma de semáforo (luz fija, intermitente, *flash*) y con incorporación de señales acústicas (zumbador, sirena).

Estos componentes cumplen con diversas especificaciones de seguridad en máquinas, como por ejemplo el grado de protección IP 54 o IP 65. Por una parte, el dispositivo debe cumplir ciertas especificaciones para la utilización para la que ha sido diseñado; por otra parte, estos dispositivos forman parte de máquinas complejas, en que se amplía el sentido de seguridad del dispositivo a la seguridad intrínseca de la máquina que todo fabricante debe prever antes de ofrecerla al mercado.

Uno de los aspectos recogidos en estas normas es la asociación del dispositivo con un color concreto y una finalidad fijada. Así, un pulsador de marcha se representa mediante el color verde. El pulsador de paro convencional se representa mediante el color negro. Un pulsador de rearme, es decir, cuando se suprimen las condiciones anormales y se reestablece el ciclo automático interrumpido, se representa mediante el color amarillo o el azul. La parada de emergencia se representa con un dispositivo que se llama *paro de emergencia* y consta de una seta de color rojo dentro de un círculo amarillo, y es de un tamaño netamente mayor al resto de pulsadores. El selector de posiciones se representa mediante el color negro, con una pestaña de color blanco.

En cuanto a los LEDs indicadores si se dispone de un LED con luz blanca se asocia a una información general de servicio, como por ejemplo la presencia de tensión en la máquina. Un LED amarillo (ámbar) indica precaución. Estamos ante una alarma que puede conducir a una situación peligrosa, como por ejemplo que se indique que la presión está fuera de los límites habituales de funcionamiento. El LED verde indica que la máquina está preparada para entrar en funcionamiento. El LED rojo indica una situación de fallo que requiere de la intervención inmediata del operario.

Recientemente han aparecido dispositivos que integran la función de controlador e indicador de información. Un mismo dispositivo presenta un pulsador con LED incorporado, de manera que cuando se procede a pulsar el dispositivo, se activa el LED correspondiente; cuando el operario deja de presionar el dispositivo, éste retorna a la posición original y se desactiva el LED. Para obtener más información relacionada con órganos de servicio, color recomendado y aplicación en el diseño de paneles de mando de máquinas, puede consultarse la nota técnica de prevención NTP n. 53 (v. Referencias).

## Diseño

Llegados a este punto, se observa que las normativas correspondientes a la seguridad en máquinas informan de especificaciones sobre los dispositivos, considerados de forma individual. La guía GEMMA, por su parte, indica en la fase de intervención el panel de mando básico que necesita el operario para poder ejercer la supervisión. A estos dos factores hay que añadir la aplicación de la ergonomía al diseño del panel de mando.

En las líneas siguientes se presentan una serie de indicaciones que se pueden tener en cuenta para el diseño de paneles de control. En este sentido, los autores consideran que es necesario mostrar pautas que conduzcan a la creación de paneles de mando sin ambigüedades ya que un panel de mando con los dispositivos desordenados puede provocar la duda o la mala interpretación del procesamiento de información que hace el operario e inducir a algún error en la ejecución de acciones sobre los controladores.<sup>1</sup>

En primer lugar, una primera distinción: funcionalidades del panel de mando distribuidas horizontalmente y verticalmente (figura A.2). A nivel horizontal, los dispositivos de información visual DIV se sitúan en la parte superior del panel y los dispositivos controladores se sitúan en la parte inferior del panel. En este sentido, es importante mantener la coherencia. Respecto los LEDS indicadores, se considera que presentan dos estados posibles básicos (activo, inactivo). En este contexto, se entiende por dispositivos controladores aquellos sobre los que el operario puede ejercer una acción que se transmite al comportamiento del automatismo y del proceso.

A nivel vertical, y atendiendo a la representación gráfica de la guía GEMMA, se dispone tres niveles. A la izquierda, se representa la situación de servicio, en correspondencia con el primer rectángulo de la izquierda que se dibuja en la guía GEMMA.

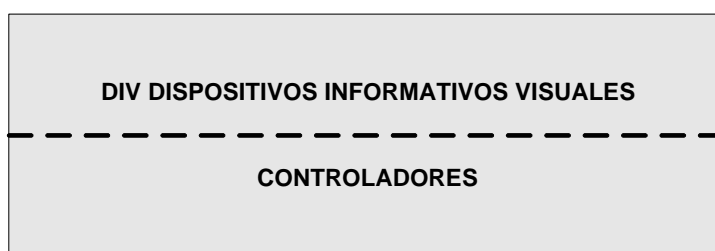


Fig. A.2 División horizontal del panel de mando

<sup>1</sup> Para una información más detallada sobre el proceso de información del sistema persona-máquina puede consultarse la nota técnica de prevención n. 241 indicada en las referencias

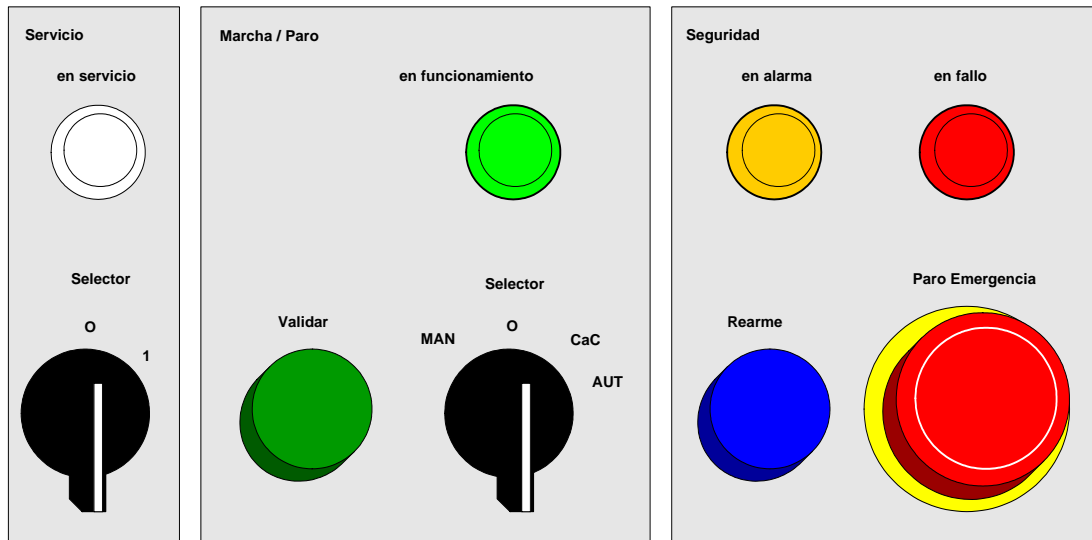


Fig. A.3 División vertical del panel de mando

En el centro, los dispositivos asociados a los modos de marcha y paro convencional. Finalmente, a la derecha, se disponen los dispositivos asociados a la seguridad. Se prefiere no situar el paro de emergencia en medio del resto de dispositivos y se ha situado abajo a la derecha para facilitar la accesibilidad sin ambigüedades.

La figura A.3 muestra la división vertical. En la parte de servicio se dispone un selector (0, 1), de manera que es el propio operario el que procede a poner en servicio la máquina o proceso; el LED blanco indica esta acción. En la parte de modos de marcha/paro el operario dispone de un selector de cuatro posiciones (MAN, 0, CaC, AUT).

La ordenación de modos en el selector de marcha/paro no es aleatoria. El modo 0 separa el lado izquierdo, en el que se selecciona el control manual humano, de los modos a la derecha de 0, que servirán para seleccionar diversos modos de control automático. En la programación y puesta en marcha de artefactos (robots, máquinas, automatismos) realizada por un operario es importante llevar a cabo un procedimiento típico que difiere de aquellas situaciones en las que el operario es experto y acumula centenares de horas de experiencia con el sistema automatizado. La ingeniería de la usabilidad nos ayuda en este sentido. En primer lugar, el operario realiza algunos pasos o etapas en modo manual. Cuando está seguro de los pasos, realiza el programa o ciclo completo. Es el ejemplo típico de la programación de un nuevo programa en un robot industrial: el operario valida cada movimiento del robot mediante una acción sobre la botonera de control; cuando finaliza la ejecución paso a paso, el operario decide que el robot ya puede realizar el programa completo a velocidad moderada. En la figura A.3 el modo CaC permite que el operario pueda observar el ciclo completo llevado a cabo por el automatismo sobre el proceso y detenerlo al final para proceder a revisiones y cambios. Una vez el operario está seguro del desarrollo del ciclo, puede escoger el modo automático AUT del selector. De ahí que, de izquierda a derecha se haya ordenado los modos en el selector como MAN, CaC y AUT.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Los estereotipos de conducta para interruptores inciden en considerar AUT arriba y MAN abajo, pero en el panel de mando aquí diseñado se ha optado por adaptar los ítems ARRIBA, ABAJO por IZQUIERDA y DERECHA de forma genérica. Para más información, consúltese la nota técnica de prevención NTP n. 226.

El modo 0 permite al operario detener la máquina en un instante concreto, sin perjuicio del funcionamiento de la misma. La selección de 0 implicará que se desea parar la máquina al cabo de un instante, en contraste con CaC que significa el paro de la máquina al finalizar el presente ciclo. Las opciones MAN/AUT permiten el paso de control semiautomático a automático, y viceversa. El selector se complementa con un pulsador, de forma que realmente el operario primero selecciona y luego valida su decisión presionando el pulsador, y así evita situaciones accidentales que se podrían dar de manera fortuita. El LED indicador de color verde informa del funcionamiento.

En la parte de seguridad se dispone del paro de emergencia y del pulsador de rearme para el reestablecimiento del ciclo. Los LEDS indicadores mostrados informan de un posible fallo de un dispositivo (en este caso, de un sensor o de un actuador) y de una situación de alarma (en la que hay que estar precavidos ante un posible agotamiento de materia prima, por ejemplo). Nótese que los LEDS quedan ordenados de izquierda a derecha como en un semáforo, verde, ámbar, rojo, lo cual facilita que el operario asemeje este escenario a su representación mental, basada en el sentido común, y sea coherente con otras representaciones presentes en la sociedad. La integración de las funcionalidades expresadas en forma de niveles verticales y horizontales, junto a las especificaciones de seguridad en máquinas y las situaciones expresadas en la guía GEMMA, permite el prototipo final del panel de mando. Si el proceso de aplicación de la guía GEMMA es iterativo ello implica que el diseño del panel de mando también puede completarse con algún dispositivo más, tal como se ilustra en el apartado siguiente.

## Utilización

Una vez el panel de mando está definido, se puede hacer una asociación de ideas entre las situaciones presentadas en la guía GEMMA y la intervención del operario sobre el panel de mando. Así, por ejemplo, se va a considerar el panel de mando académico de la figura A.1. Se quiere llevar a cabo una situación típica en la guía GEMMA, que se denomina *la marcha por ciclos y paro a fin de ciclo*. Sobre el panel didáctico de la figura A.1 el operario dispone el selector MAN/AUT del panel en modo automático y la validación se lleva a cabo sobre el pulsador de marcha MARCHA. Ello permite la transición del estado A1 a F1 en la representación gráfica de la guía GEMMA (figura A.4). Para concretar el paro solicitado a fin de ciclo, se observa que el panel de mando no presenta en el selector la opción CaC. Una posibilidad de llevar a cabo este paro sería utilizar el pulsador RESET para este fin. Para no crear ambigüedades en el uso de este panel de mando se propone una propuesta de mejora con la posibilidad de incluir un pulsador con la finalidad de paro a fin de ciclo CaC. Cabe destacar que el panel de mando comentado puede ser un panel ya diseñado por la casa comercial, y así se suministra al cliente, pero cualquier ingeniero puede adquirir los componentes (caja, etiquetas, pulsadores, selectores, etc.) y generar él mismo un panel de mando a medida.



Fig. A.4 Panel de mando académico

En la situación de la guía GEMMA denominada *marcha de verificación con orden*, es habitual que el operario cambie de modo automático a manual y proceda a la verificación de acciones paso a paso. Este caso se ilustra mediante la Figura A.5.

En el paso 1-2 el operario pasa de modo automático AUT a manual MAN. En este caso, el pulsador de marcha del panel de mando MARCHA es usado como pulsador de verificación de las etapas del control secuencial, y esta acción del operario es imprescindible para pasar a la etapa siguiente. Obsérvese que en este panel académico el pulsador de marcha ha cambiado de funcionalidad en función de la situación. Este detalle se ha evitado en el panel propuesto en la figura A.3 ya que puede inducir a una mala interpretación de la situación. Para evitar esta duplicidad de finalidades asociadas a un mismo controlador, se propone, por ejemplo, añadir este subpanel opcional (figura 1.6).



Fig. A.5 Panel de mando académico

En primer lugar, partiendo del panel de control de la figura A.3 el operario selecciona el modo manual y valida su decisión sobre el pulsador. A continuación el operario fija su atención en el subpanel de la figura 1.6. El operario selecciona la verificación en orden/desorden.

Obsérvese que el operario debe girar a la izquierda los selectores, el primero para el modo MAN y el segundo para escoger Orden o Desorden, y finalmente validar mediante el pulsador. En la situación de verificación en orden, el operario inspecciona visualmente la situación y dispone de un pulsador para verificar cada una de las etapas del ciclo. En la situación de verificación en desorden, el operario puede accionar cualquier dispositivo en el orden que quiera.

Por ejemplo, en la Figura A.6 se representan las acciones sobre dos cilindros neumáticos de doble efecto A (A+ avance, A- retroceso) y B (B+ avance, B- retroceso), junto con sus correspondientes sensores finales de carrera (leds a0, a1, b0, b1 respectivamente). El operario puede accionar cualquiera de ellos de forma autónoma, y recibir información de la posición de los cilindros mediante la información del activado de los LEDS.

El problema subyacente en la situación de verificación recogida en la guía GEMMA es que, si la cantidad de dispositivos a accionar por el operario es elevada, entonces el subpanel puede ser complicado de diseñar. Es recomendable analizar, de todo el proceso/máquina, qué actuadores en concreto nos interesan para proceder al modo de verificación.

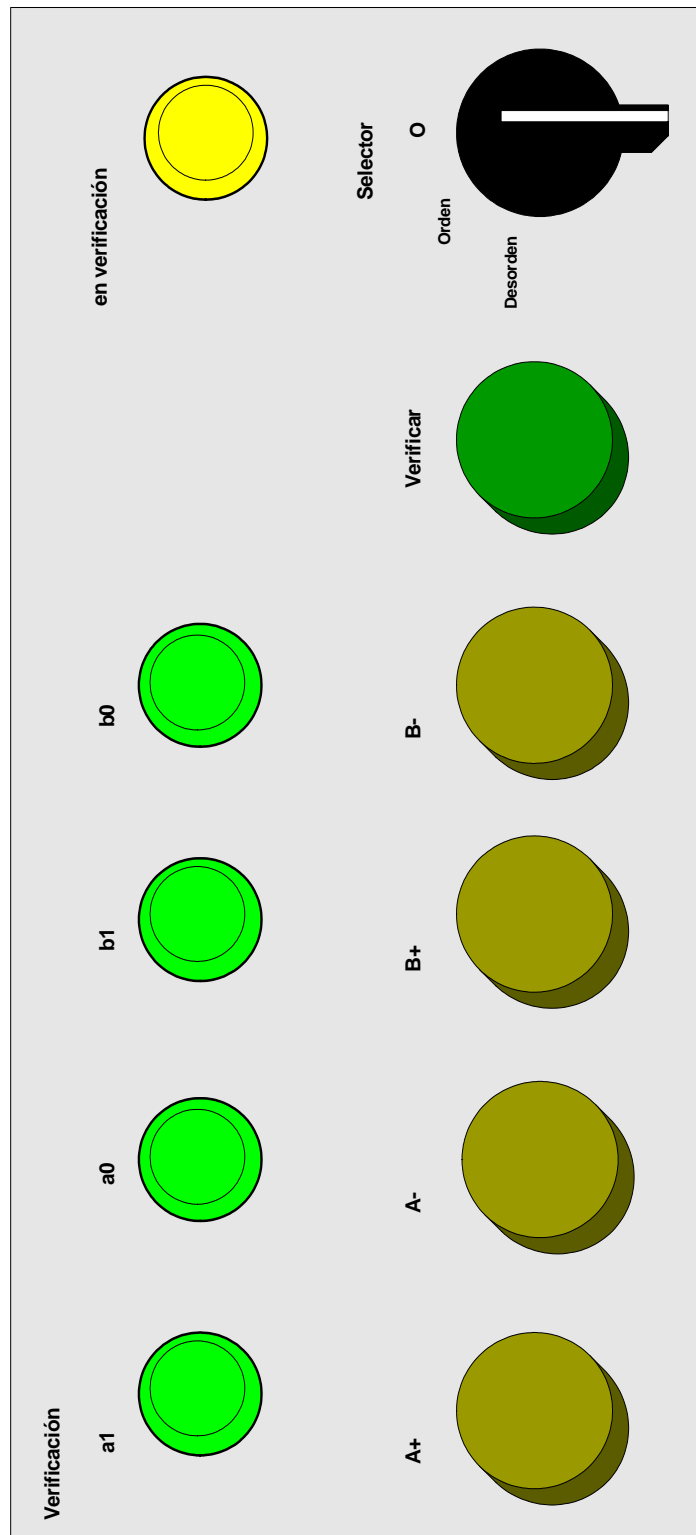


Fig. A.6 Subpanel de verificación

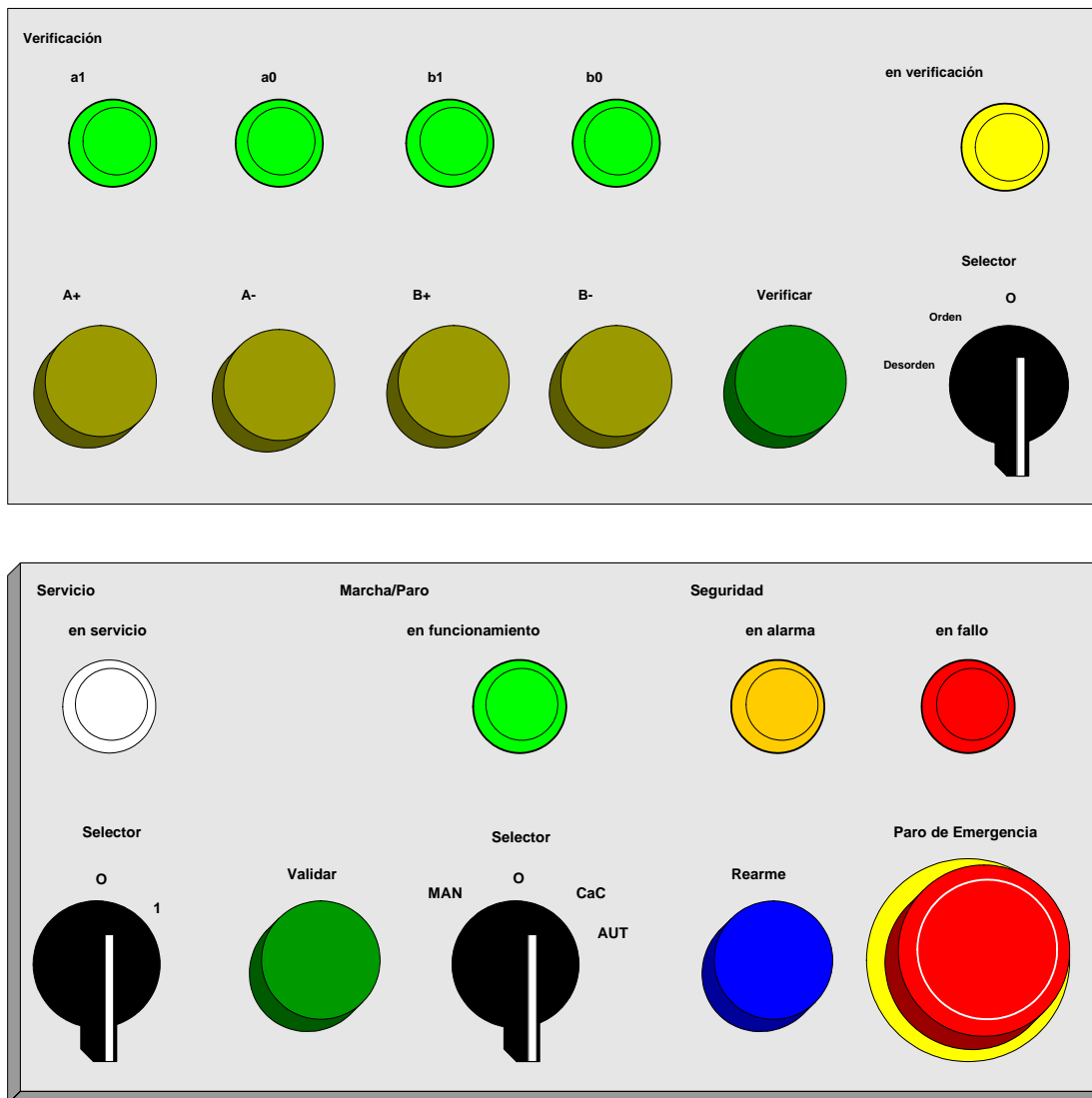


Fig. A.7 Integración de subpaneles para la obtención de panel de mando integrado.

Una vez seleccionados algunos actuadores y sensores, se puede generar el subpanel y ubicar los indicadores y controladores.

Nótese que, en la propuesta conjunta del panel de la figura A.3 junto con el subpanel de la figura A.6, los controladores presentan una sola y clara función y no existe el solapamiento presente en el panel académico. Se ha optado por representar el panel en forma vertical respetando la funcionalidad de cada uno de los paneles (figura A.7).

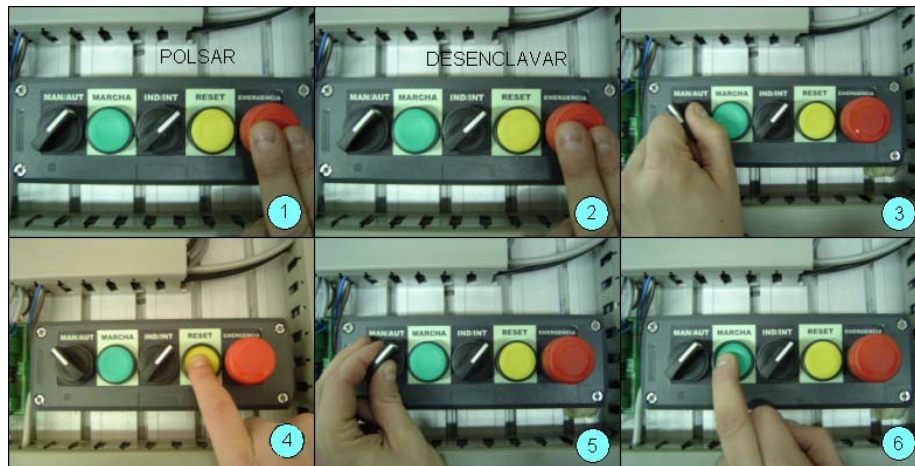


Fig. A.8 Intervención del operario en la situación de parada de emergencia y posterior solución del problema

Otra situación relevante es *la parada de emergencia*. Mediante el panel académico, esta situación se ilustra con la secuencia de fotografías de la figura A.7.

El operario aprecia un riesgo elevado de daño sobre otros operarios o sobre máquinas y decide intervenir al apretar el paro de emergencia. A continuación, procede a desenclavar el paro, al tratarse de un componente electromecánico que hay que restituir a la situación original de forma manual con un giro a la izquierda del dispositivo. A continuación, el operario pasa el selector de modo automático a manual. En esta fase, el operario realiza tareas de solución de problemas, como atender al operario herido, reponer los dispositivos rotos ante un accidente, o cambiar los dispositivos en fallo. Una vez finalizado el problema, el operario debe llevar a cabo una serie de actividades para la reanudación del ciclo, empezando por utilizar el pulsador de RESET como rearme del sistema. Vuelve a poner el sistema en modo automático y reinicia la marcha al apretar el pulsador de marcha.

Las limitaciones del panel académico son evidentes, ya que al existir únicamente dispositivos controladores se carece de información básica que permita ofrecer al operario información clara; el operario debe combinar sus acciones sobre el panel con la visualización directa de los cambios en la máquina/proceso. En este sentido, el panel de mando de la figura A.3 es más detallado. Si se activa el LED indicador de alarma, el propio operario puede juzgar si la situación es tan grave como para detener todo el sistema mediante el paro de emergencia, o dejar seguir el ciclo pese a la anomalía. Anteponer un LED de precaución permite al operario estar alerta y dejarle un margen para que elabore su decisión siguiente sin una presión temporal excesiva. En este sentido, este nivel vertical de seguridad del panel podría enriquecerse con un LED que funcionase de modo intermitente o añadiendo un dispositivo de información acústico. El LED indicador de fallo aporta información sobre el mal funcionamiento de sensores y actuadores claves en el desarrollo del ciclo o su interrupción.



## Anexo B. Representación alternativa de la guía GEMMA

Observando detenidamente la representación gráfica convencional de la guía GEMMA, los autores valoran la posibilidad de plantear una relectura que dé paso a un debate sobre las posibles mejoras en la comprensión de la guía.

De forma genérica, se dispone de:

- *PZ*: Control sin alimentar
- Familia *A*
  - Procedimientos de Reinicio
  - Procedimientos de Parada
- Familia *F*
  - Procedimientos de funcionamiento transitorio
  - Procedimientos de funcionamiento normal
  - Procedimientos de verificación y test
- Familia *D*
  - Procedimientos de fallo (f)

En una primera aproximación a la guía, la relación entre familias en condiciones normales pasa por la conexión entre *A* (*Procedimientos de parada*) y *F* (*Procedimientos de funcionamiento normal*). Y como caso particular de este funcionamiento, el operario puede intervenir en *F* (*Procedimientos de verificación y test*).

En una segunda aproximación a la guía, la relación entre familias en condiciones de funcionamiento deteriorado ante defectos y/o fallos se traduce por la conexión desde *F* (*Procedimientos de funcionamiento normal*) hacia *F* (*Procedimientos de funcionamiento transitorio*), siguiendo por *A* (*Procedimientos de reinicio*) y volviendo a *A* (*Procedimientos de parada*).

Es importante aclarar que la utilización de la guía ante situaciones conflictivas (defectos y/o fallos) no debe implicar conductas inseguras. En una primera valoración, los autores consideran la necesidad de reconducir el estado actual del sistema automatizado hasta el estado inicial. Es difícil prever el funcionamiento deteriorado de sistemas automatizados en un estado intermedio a gobernar por el operario; es muy recomendable volver a la situación de condiciones iniciales aunque ello signifique un paro de la producción. En una segunda valoración, si a lo largo del desarrollo del ciclo, y en pleno funcionamiento normal, se detecta un defecto, se procederá al conjunto de estados agrupados como *F* (*Procedimientos de funcionamiento transitorio*). Es decir, los autores consideran que la detección de un defecto puede ser interpretada como una *producción pese al defecto*, pero sólo en el presente ciclo. Antes de reiniciar un nuevo ciclo en el que se arrastre la producción deteriorada con un defecto, los autores valoran la necesidad de realizar *D2* (*Diagnóstico fallos/defectos y tratamiento fallos/defectos*) y atajar definitivamente el problema previamente a reemprender el funcionamiento normal.

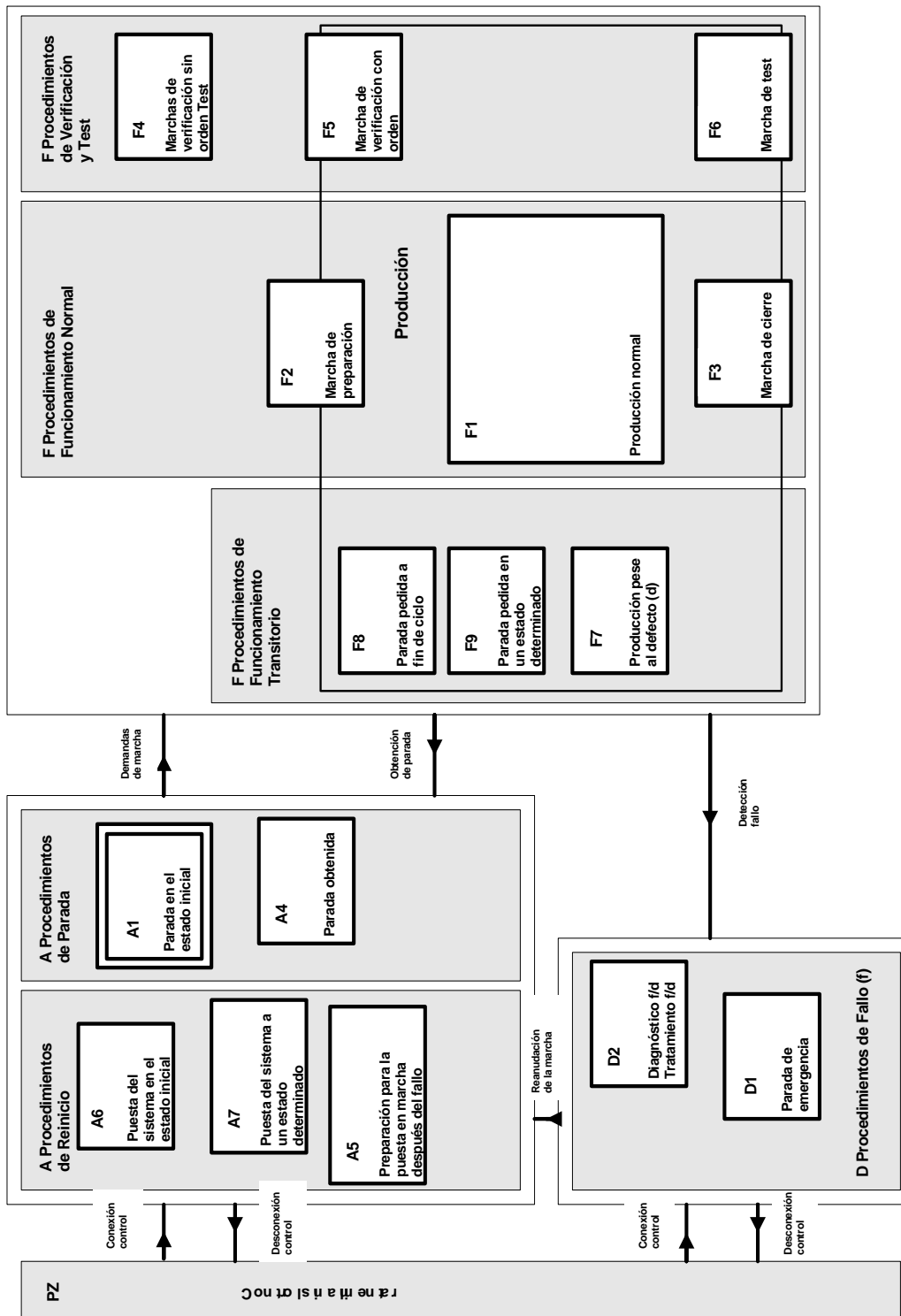


Fig. B.1 Representación alternativa de la guía GEMMA

Con estas ideas en mente, se han reorganizado los estados/modos de la representación gráfica convencional de la guía GEMMA para ofrecer una versión alternativa, tal como puede observarse en la figura B.1.

En la representación convencional de la guía GEMMA, aparece el modo *D3 (Producción pese al defecto)*. Tal como su nombre indica, está claramente relacionado con *F1 (Producción Normal)*, y en cualquier caso no se detiene el funcionamiento y se sigue produciendo. Por este motivo, en la figura B.1 se ha reemplazado la etiqueta *D3* por *F7* y el modo se ha añadido a la familia *F*.

De nuevo, en la representación convencional de la guía GEMMA aparecen los modos *A2 (Parada a fin de Ciclo)* y *A3 (Parada pedida en un estado determinado)*. Tal como las descripciones indican, el operario interviene sobre el panel de mando para solicitar alguno de estos modos, y en cualquier caso el ciclo continúa hasta el final o hasta alcanzar el estado intermedio solicitado, respectivamente. Es decir, se sigue produciendo. Por este motivo, en la figura B.1 se ha reemplazado la etiqueta *A2* por *F8* y la etiqueta *A3* por *F9*, y los dos modos se han añadido a la familia *F*.

Observando de nuevo la representación alternativa presentada de la guía GEMMA, los rectángulos grandes agrupan los modos de una forma coherente y con una funcionalidad clara. Si hubiera necesidad de incluir un nuevo modo conociendo su finalidad, se podría asociar claramente dentro de uno de los grandes rectángulos.

Para finalizar este anexo, hay que comentar que las transiciones entre modos no se han incluido en la figura B.1 para facilitar al usuario la posibilidad de trazar a medida las transiciones entre modos, en función de la máquina o proceso.

Se entiende que este trazado se mejora después de aplicar la metodología de forma iterativa, por lo que se deja la representación abierta para que el operario/usuario la complete o simplifique.



## Bibliografía

Debido a la presentación multidisciplinaria de contenidos de algunos fragmentos del libro, es necesario asignar las referencias a áreas concretas para facilitar una consulta posterior con mayor profundidad. Entre ellas, cabe destacar: ergonomía, supervisión, automatización básica, GRAFCET y GEMMA, y finalmente seguridad.

### Ergonomía

[CAÑA04] CAÑAS, J.J. (2004). *Personas y máquinas: el diseño de su interacción desde la ergonomía cognitiva*. Pirámide.

[MOND96] MONDELO, P.R.; GREGORI, E. (1996). *La ergonomía en la ingeniería de sistemas*. Editorial ISDEFE, (Monografías Serie Azul sobre Ingeniería de Sistemas, n. 13).

[MOND01] MONDELO, P.R. (2001). *Ergonomía 3: diseño del lugar de trabajo*. Edicions UPC. (Aula Politècnica/ETSEIB).

[PONS05] PONS, P.; DÍAZ, M.; VILANOVA, R. (2005). *Ergonomía aplicada al diseño de interfaz operario-máquina en entorno industrial*. Interacción 2005. Simposio S8 Interacción Persona-Ordenador, CEDI 2005 Primer Congreso Español de Informática, Granada.

### Supervisión

[ARME00] ARMENGOL, J.; MELÉNDEZ, J.; AYZA, J. (2000). *Sistemas de supervisión*. Cuadernos CEA-IFAC, n. 1.

[DEPR03] DE PRADA, C. (2003). *El futuro del control de procesos*. Ponencia presentada en las Jornadas Nacionales de Automática CEA-IFAC, León.

[PONS04] PONS, P.; DÍAZ, M. (2004). *Metodología para el estudio de la interacción operador-ordenador en tareas industriales de supervisión*. Interacción 2004. V Congreso Interacción Persona-Ordenador, Lleida.

[PUIG04] PUIG, V.; QUEVEDO, J.; ESCOBET, T.; MORCEGO, B. (2004). "Control tolerante a fallos (Parte I): Fundamentos y diagnóstico de fallos". *Revista Iberoamericana de Automatización Industrial*, vol I, n. 1.

### Automatización básica

- [BALC97] BALCELLS, J.; ROMERAL, J.L. (1997). *Autómatas programables*. Marcombo Boixareu Editores.
- [BOIX95] BOIX, O.; SAIGÍ, M.A.; ZABALETA, F. (1995). *Automatismos eléctricos programables*. Edicions UPC. (Colección Aula Teòrica n. 5).
- [BOUT87] BOUTEILLE, D.; BELFORTE, G. (1987). *Automazione flessibile elettropneumatica e pneumatica*. Editorial Tecniche Nuove.
- [DOMI03] DOMINGO, J.; GÁMIZ, J.; GRAU, A.; MARTÍNEZ, H. (2003). *Diseño y aplicaciones con autómatas programables*. Editorial UOC. (Biblioteca Multimedia-Industria).
- [GARC01] GARCÍA, E. (2001). *Automatización de procesos industriales*. Servicio de Publicaciones de la UPV, Ref.: 4116.
- [HYDE97] HYDE, J.; REGUÉ, J.; CUSPINERA, A. (1997). *Control electroneumático y electrónico*. Marcombo Boixareu Editores. (Biblioteca Técnica Norgren n. 2).
- [MAND04] MANDADO, E.; PÉREZ, S.; MARCOS, J.; FERNÁNDEZ, C.; ARMESTO, J.I. (2004). *Autómatas programables: entorno y aplicaciones*. Thomson Paraninfo.
- [MILL95] MILLAN, S. (1995). *Automatización neumática y electroneumática*. Marcombo Boixareu Editores. (Biblioteca Técnica Norgren n. 1).
- [PIED03] PIEDRAFITA, R. (2003). *Ingeniería de la automatización industrial*. Ra-Ma.
- [PORR94] PORRAS, A.; MONTANERO, A.P. (1994). *Autómatas programables*. McGrawHill.
- [ROME94] ROMERA, J.P.; LORITE, J.A.; MONTOSO, S. (1994). *Automatización: problemas resueltos con autómatas programables*. Paraninfo.
- [SERR96] SERRANO, A. (1996). *Neumática*. Paraninfo.

### GRAF CET y GEMMA

- [ADEP81] ADEPA (1981). *Le GEMMA. Guide d'Étude des Modes de Marches et d'Arrêts*. Montrouge: ADEPA.
- [AFCE95] AFCET-ADEPA (1995). *Le GRAFCET*. 2ª ed. Toulouse: Cépaduès. <<http://lurpa.ens-cachan/grafcet.html>>.
- [BOIX01] BOIX, O.; SUDRIÀ, A.; BERGAS, J. (2001). *Automatització industrial amb GRAFCET*. Edicions UPC. (Colección Aula Politècnica / ETSEIB n. 54).
- [BOSS95] BOSSY, J.C.; BRARD, P.; FAUGÈRE, P.; MERLAUD, C. (1995). *GRAFCET Práctica y aplicaciones*. Edicions UPC. (Quadern Aula n. 12).
- [BREU03] BREU, J. (2003). *Curso guía GEMMA*. Foro de discusión sobre autómatas programables. <<http://www.automatas.org>>.

[CASA04] CASAS, A.; CALVO, D. (2004). *Guía GEMMA aplicada a proceso continuo de bobinado de cable de la empresa PIRELLI Cable*. Documento interno del Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la UPC.

[CEI88] CEI (1988). *Etablissement de diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande IEC 848*. Norma de la CEI.

[CHAP05] CHAPPE, D. (2005). *Cours d'Automatique: cours GRAFCET*. Documentación interna de ENSMM. Laboratoire d'Automatique de Besançon. <[http://www.lab.ens2m.fr/cours\\_automatique/grafcet/sommaire.htm](http://www.lab.ens2m.fr/cours_automatique/grafcet/sommaire.htm)>.

[CHAP01] CHAPURLAT, V.; PRUNET, F. (2001). *Presentation du GRAFCET: GRAPhe Fonctionnel de Commande Etape/Transition*. Documentación interna del Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production, LGI2P EMA/EERIE. <<http://www.eerie.fr/chapurla>>.

[DECO05] DECOTIGNIE, J.D. (2005). *GRAFCET et réseaux de Petri*. Documentación interna de CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique.

[GARC04] GARCÍA, E (2004). *Automatización de procesos complejos*. V Curso de Especialización en Automática del CEA-IFAC. Calpe, Alicante.

[GOUR01] GOURDEAU, R.; CIOUTIER, G.M. (2001). *ELE3202 Introduction à l'automatisation. Le GRAFCET*. Documentación interna de École Polytechnique de Montréal. <[http://www.cours.polymtl.ca/ele4202/PDF/RGourdeau\\_grafcet.pdf](http://www.cours.polymtl.ca/ele4202/PDF/RGourdeau_grafcet.pdf)>.

[LAND05] LANDRY, J.A. (2005). *L'ingénieur en production automatique*. École de Technologie Supérieure, Université du Québec. <<http://www.gpa.etsmtl.ca/cours/gpa140>>.

[MORE97] MORENO, S.; PEULOT, E. (1997). *Le GEMMA: modes de marches et d'arrêts, GRAFCET de coordination des tâches, conception des systèmes automatisés*. Casteillar Educalivre.

[RODR04] RODRÍGUEZ, J.A. (2004). *Guía GEMMA*. Documento interno del Departamento de Electrónica y Automática de la Universidad Pontificia Comillas. Madrid: ICAI.

[TONI05] TONIELLI, A. (2005). *Sistemi e Technologie per l'Automazione*. Documento interno de DEIS, Universidad de Bolonia. <<http://www.-lar.deis.unibo.it/atonielli>>.

## Seguridad

[CHAV05] CHAVARRIA, R. (2005). *Equipo eléctrico de máquinas herramienta. Órganos de servicio. Colores*. Nota técnica de Prevención NTP n. 53. <<http://www.mtas.es/insht/ntp>>.

[NOGA05] NOGAREDA, C. (2005). *Mandos: ergonomía de diseño y accesibilidad*. Nota técnica de Prevención NTP n. 226. <<http://www.mtas.es/insht/ntp>>.

[ONCI05] ONCINS, M. (2005). *Mandos y señales: ergonomía de percepciones*. Nota técnica de Prevención NTP n. 241. <<http://www.mtas.es/insht/ntp>>.





