

## Los Modelos en la Ingeniería de Sistemas

Fernández Sánchez, José Luis

Área de Proyectos de Ingeniería  
E.T.S. Ingenieros Industriales  
Universidad Politécnica de Madrid  
C/José Gutiérrez Abascal 2  
28006 Madrid (Spain)  
e-mail: jlfdez@ingor.etsii.upm.es

---

### RESUMEN

La ingeniería de sistemas propone un enfoque multidisciplinar para el desarrollo de productos de alta complejidad.

Para evitar la existencia de un número excesivo de técnicas de modelado y herramientas, la industria ha tomado la iniciativa de estandarizar las técnicas de modelado de la ingeniería de sistemas, proponiendo la notación y semántica para los siguientes tipos de modelos: estructurales, comportamiento, requisitos y paramétricos.

El presente artículo pretende resumir las características de dichos modelos y describir una implementación de dicha aproximación con la metodología y herramienta PPOOA desarrollada por un equipo liderado por el autor. Se ilustrará el artículo con un ejemplo de robot industrial.

**Palabras clave:** ingeniería de sistemas, modelos estructurales, modelos de comportamiento, modelos paramétricos.

### ABSTRACT

Systems engineering proposes a multidisciplinary approach for the development of complex products.

In order to avoid the existence of an excessive variety of modeling techniques and tools, the industry has an initiative to standardize systems engineering modeling techniques, proposing a notation and semantics for structural, behavior, requirements and parametric models.

This paper summarizes the main characteristics of these models and describes PPOOA, as an implementation of a system's modeling approach. PPOOA is a method and a tool developed by a team led by the author. PPOOA is illustrated with an industrial robot example.

**Key Words:** systems engineering, structural models, behavioral models, parametric models.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería de sistemas surge a mediados del siglo XX para permitir un enfoque multidisciplinar en el desarrollo de productos de alta complejidad. Aunque su aplicación en los comienzos fue en grandes proyectos del sector de defensa y aeroespacial, actualmente la diversidad de productos de alta complejidad: teléfonos móviles, sistemas del automóvil y robots industriales, ha supuesto un mayor campo de aplicación de la ingeniería de sistemas, cuyos aspectos comunes con la dirección de proyectos no se debe obviar.

En sus primeros tiempos y actualmente, la ingeniería de sistemas estaba orientada a la documentación. Es decir los ingenieros de sistemas al desarrollar un producto documentaban éste utilizando descripciones textuales y cálculos en un conjunto de documentos de especificaciones y diseño, completando éstos con planos para describir la arquitectura física del producto.

La anterior aproximación tenía como consecuencias la dificultad de mantener la documentación al día, la ambigüedad del lenguaje natural para describir problemas de ingeniería y la dificultad de la evaluación rigurosa de las soluciones escogidas.

Actualmente la ingeniería de sistemas esta cambiando su orientación a un enfoque orientado a los modelos, que describen el sistema según diferentes puntos de vista y utilizando notaciones diversas. Este enfoque conlleva las siguientes ventajas:

- Los modelos son un medio de comunicación con los clientes, usuarios y fabricantes,
- permiten mantener la integridad del sistema mediante la coordinación de las actividades de diseño,
- ayudan a diseñar suministrando plantillas, y organizando y registrando las decisiones,
- y permiten explorar y manipular los parámetros y características de la solución, guiando en la agregación y descomposición de las funciones del sistema, sus componentes y elementos constructivos.

Para evitar la existencia de un número excesivo de técnicas de modelado y herramientas, la industria ha tomado la iniciativa de estandarizar las técnicas de modelado de la ingeniería de sistemas, proponiendo la notación y semántica para los siguientes tipos de modelos: estructurales, comportamiento, requisitos y paramétricos.

El presente artículo pretende resumir las características de dichos modelos y describir una implementación de dicha aproximación con la metodología y herramienta PPOOA desarrollada por un equipo liderado por el autor. Se ilustrará el artículo con un ejemplo de robot industrial.

## 2. LAS VISTAS Y LOS MODELOS DE UN SISTEMA

Un sistema se considera como un conjunto integrado de elementos que realizan una misión u objetivo específico. Por consiguiente lo que caracteriza a un sistema es la alta integración entre sus elementos constructivos, que pueden ser elementos físicos o lógicos, y la consecución de un objetivo único o misión para la que el sistema ha sido desarrollado.

La alta integración entre los elementos constructivos de un sistema conlleva la aparición de propiedades emergentes, aquellas que son observables para el sistema completo pero no pueden ser asignadas fácilmente a sus partes constituyentes. Un ejemplo de propiedad emergente es la disponibilidad de un sistema, por ejemplo de un avión, ésta no se puede asignar fácilmente a los segmentos y componentes del avión pues no es sólo consecuencia de cada uno de ellos sino de su propia interacción.

La alta complejidad de los sistemas donde no es sólo importante la diversidad de sus partes o elementos constructivos sino la interacción de estos, requiere la presentación del sistema utilizando diferentes puntos de vista.

Una vista describe un sistema con respecto a un conjunto de propiedades o aspectos que el ingeniero quiere analizar. El conjunto de vistas necesarias para describir un sistema en cada momento depende del tipo de sistema, la fase del ciclo de vida de éste y las necesidades de ingeniería.

El conjunto de vistas utilizadas para describir un sistema ha de ser completa, cubrir todos los aspectos concernientes al sistema, y ortogonal, es decir cada vista captura información diferente relativa al sistema.

La figura 1 representa el conjunto de vistas de un sistema que propone Reichtin [6]. Este conjunto de vistas representan diferentes aspectos de un sistema, y resumidamente son:

- Propósito/ objetivos. esta vista representa las necesidades del cliente y usuarios del sistema.
- Estructura, también llamada de forma, representa los elementos o partes del sistema y su organización. Parte fundamental de la descripción de los elementos de un sistema es la definición de las interfaces de estos.
- Comportamiento, también llamada vista funcional, describe lo que hace el sistema, a diferencia de la vista estructural que describe cómo es el sistema.
- Prestaciones, esta vista describe o predice cómo el sistema va a satisfacer una funcionalidad. La vista de prestaciones es normalmente cuantitativa y los modelos que la describen se aplican a funcionalidades del sistema.
- Datos. Esta vista es importante en aquellos sistemas donde la información a gestionar es elevada. La vista de datos describe los datos y relaciones entre estos de importancia para el sistema.
- Dirección. Esta vista representa los aspectos de dirección de proyecto del sistema, su planificación, programación y presupuesto.

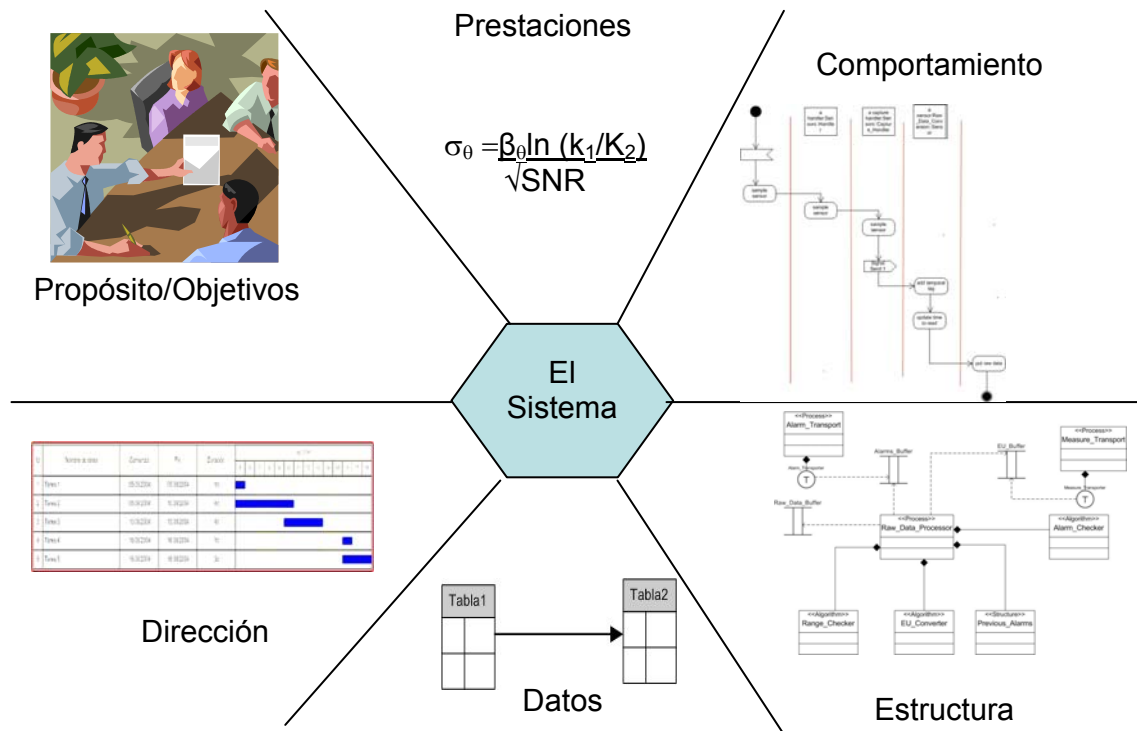


Fig. 1- Las Vistas de un Sistema

Cada una de las vistas anteriores puede ser representada con multitud de modelos. Por razones de extensión del artículo, no se pueden describir en profundidad todas las técnicas de modelado que se podrían utilizar para cada una de las vistas. Identificaremos sólo algunas de ellas que son las más utilizadas por la industria.

Para la vista de propósito y objetivos se utilizan modelos de representación de requisitos, objetivos y casos de uso del sistema [2].

Para la vista de estructura o forma se utilizan diagramas de bloques (diagramas de interconexión de sistemas, diagramas de flujo, diagramas de procesos, diagramas de clases en UML, diagramas de instalaciones de fabricación), y modelos a escala y prototipos.

Para la vista de comportamiento o funcional existen diversas técnicas de modelado como escenarios, redes de datos y eventos, modelos basados en la teoría de sistemas (sistemas continuos, sistemas discretos, sistemas discretos orientados a eventos), modelos basados en sistemas autónomos y caóticos, y modelos de comportamientos sociales.

La vista de prestaciones utiliza diversas técnicas de modelado que se pueden basar en métodos analíticos, modelos de simulación o técnicas de evaluación de las prestaciones por expertos.

La vista de datos se suele basar en modelos de entidad relación, modelos orientados a objetos, ontologías y redes semánticas.

La vista de dirección de proyectos se suele basar en las técnicas de planificación y programación de proyectos ampliamente conocidas como Gantt, PERT y otras.

La diversidad de modelos, su diferente semántica y notación dificultan el trabajo en equipo y la interoperabilidad entre las herramientas de diseño de ingeniería. Esto ha llevado a la industria a tomar la iniciativa en el establecimiento de un estándar de los modelos a utilizar en la ingeniería de sistemas. Ese estándar, que en el momento de escribir el artículo está en proceso de aprobación, se conoce como SysML("System Modeling Language") [7], y será descrito en la siguiente sección de este artículo.

### 3. EL ESTANDAR SYSML DE MODELADO DE SISTEMAS

SysML es una notación de modelado para la ingeniería de sistemas. SysML es el resultado de una iniciativa de los profesionales y la industria que en el año 2001 tomaron la decisión de adaptar la notación UML ("Unified Modeling Language") [5] de uso en aplicaciones software, en una notación más general que sirva para el desarrollo de cualquier tipo de sistemas.

SysML tiene como objetivo proporcionar técnicas de modelado de una gran variedad de sistemas entre los que se incluyen equipos físicos, software, datos, personas, procedimientos e instalaciones.

SysML no contempla específicamente la dirección de proyectos de ingeniería de sistemas. Es decir aspectos como la planificación, gestión de riesgos y gestión de la configuración no están contemplados.

Los diagramas soportados en el estándar de SysML son los identificados a continuación:

- Diagrama de casos de uso que describe la utilización del sistema por otros sistemas, dispositivos o usuarios.
- Diagrama de clases que define los elementos del sistema y sus relaciones.
- Diagramas de montaje. Este diagrama describe el sistema como un conjunto de partes con responsabilidades específicas dentro del todo.

La figura 2 representa un ejemplo ilustrativo del diagrama de montaje del subsistema motriz de un automóvil [7]. En él aparecen como partes el control del vehículo, motor, transmisión, diferencial y ruedas. Entre las partes pueden existir flujos de información (señales), masa (combustible) o energía (par motor).

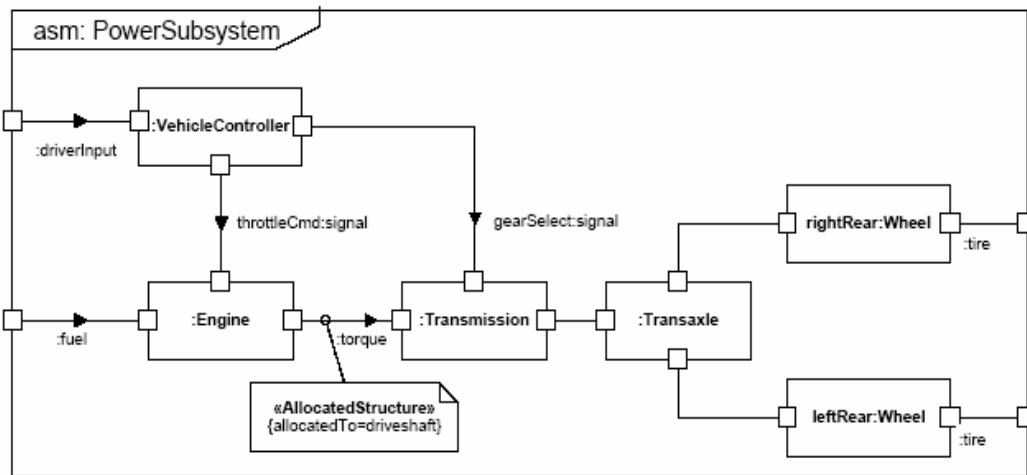


Fig. 2 - Diagrama de Montaje del Subsistema Motriz de un Automóvil [7]

- Diagrama paramétrico. Este diagrama ofrece la posibilidad de integrar los diagramas de montaje del sistema o subsistemas con el análisis de ingeniería, que actualmente es soportado por diversas aplicaciones software comerciales. Las restricciones se aplican a propiedades del sistema.

La figura 3 muestra un ejemplo de diagrama paramétrico, donde se muestran las ecuaciones (restricciones de los parámetros) que relacionan los parámetros del automóvil que influyen en sus prestaciones relativas a aceleración y velocidad.

- Diagrama de actividad que muestra el comportamiento o funcionalidad del sistema como flujos de control entre las actividades que realizan las diferentes partes del sistema.
- Diagramas de interacción incluyen el diagrama de secuencia, el diagrama de vista general de la interacción y el diagrama temporal. Estos diagramas son prácticamente los mismos que los utilizados en UML [5] y no se explicarán aquí.
- Diagramas de estados, que son utilizados para modelar comportamiento discreto utilizando máquinas de estados.

SysML es riguroso en la semántica y uso de la notación pero a la vez busca el objetivo de su fácil adopción por la industria. El objetivo de facilidad de uso se describe en un requisito de formación que establece que el 90% de los ingenieros de sistemas con más de 5 años de experiencia deberían interpretar el 75% de la notación empleada en los modelos de SysML después de una formación no mayor de 20 horas.

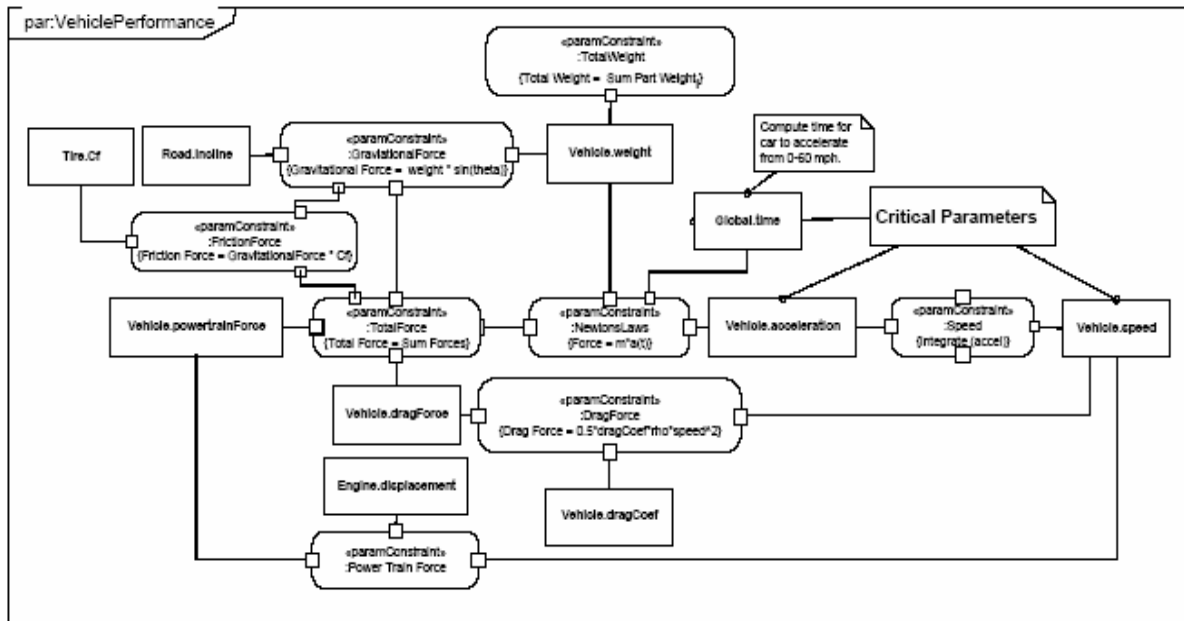


Fig. 3 - Diagrama Paramétrico de las Prestaciones de un Automóvil [7]

#### 4. PPOOA UNA METODOLOGÍA PARA LA ARQUITECTURA DE SISTEMAS

PPOOA (“Pipelines of Processes in Object Oriented Architectures”) es un estilo de arquitectura de sistemas de tiempo real e intensivos en software [1]. Los sistemas de tiempo real se consideran aquellos donde el no cumplimiento de los requisitos temporales es tan crítico como el no cumplimiento de los requisitos funcionales.

PPOOA está basado en el paradigma de la “cadena de producción” donde los diferentes procesos software van actuando sobre los datos en secuencia, y transforman o procesan dichos datos, de modo similar a una cadena de producción donde diferentes operarios o máquinas procesan o ensamblan un producto.

Las arquitecturas orientadas a las “tuberías de procesos” se emplean en diversos sistemas de tiempo real, entre los que se incluyen los sistemas de control de tráfico aéreo y los SCADAs (Supervisory Control and Data Acquisition) utilizados en la monitorización de plantas de generación de energía y en sistemas de abastecimiento de agua, gas y electricidad.

Los elementos constructivos típicos de estas arquitecturas son los componentes o lugares de cómputo y los mecanismos de coordinación que hacen el papel de tuberías y válvulas lógicas en las interacciones entre componentes. Los mecanismos de coordinación controlan la sincronización y comunicación de información entre los componentes de la arquitectura del sistema.

En PPOOA se modela la estructura y comportamiento del sistema con dos tipos de diagramas: diagramas de arquitectura y CFAs (Causal Flow of Activities), que son diagramas de flujos causales de eventos representados con diagramas de actividad de UML.

Para ilustrar la aplicación de la metodología PPOOA se va a describir un ejemplo de robot industrial basado en uno de ABB Robotics. El sistema a modelar es la aplicación de software que a partir de órdenes de trabajo elaboradas por el operador del robot, genera las microcoordenadas de control de los tres brazos robóticos que controla el sistema robótico.

Los diversos procesos de software que forman la arquitectura del robot se comunican por colas de mensajes.

La arquitectura del sistema robótico modelada utilizando PPOOA incluye cuatro subsistemas principales: Planificador, Control de Brazos, Servicios del Sistema Operativo y Varios. Por razones de espacio no podemos describirlos con detalle aquí. El lector interesado puede encontrar el ejemplo completo en el informe técnico de la arquitectura [4].

De modo ilustrativo, se representa en la figura 4 el diagrama de arquitectura de la vista de estructura del Subsistema Planificador. En la figura se ven tres procesos Planificador que leen órdenes de trabajo de una cola y las descomponen en órdenes de subtrabajo que son colocadas en otra cola. Dicha cola es leída por un proceso de generación de microcoordenadas, que se encarga de generar las microcoordenadas de destino de uno de los tres brazos robóticos. Además de las colas aparece en el diagrama un mecanismo de coordinación de tipo semáforo, muy habitual en sistemas de tiempo real. Este semáforo controla el acceso a los datos de "feedback" que necesitan los planificadores para generar las subórdenes de trabajo.

En el diagrama de arquitectura aparecen reflejadas las relaciones de dependencia entre componentes y entre éstos y los mecanismos de coordinación. Las relaciones de dependencia en consistencia con la notación UML se representan por flechas.

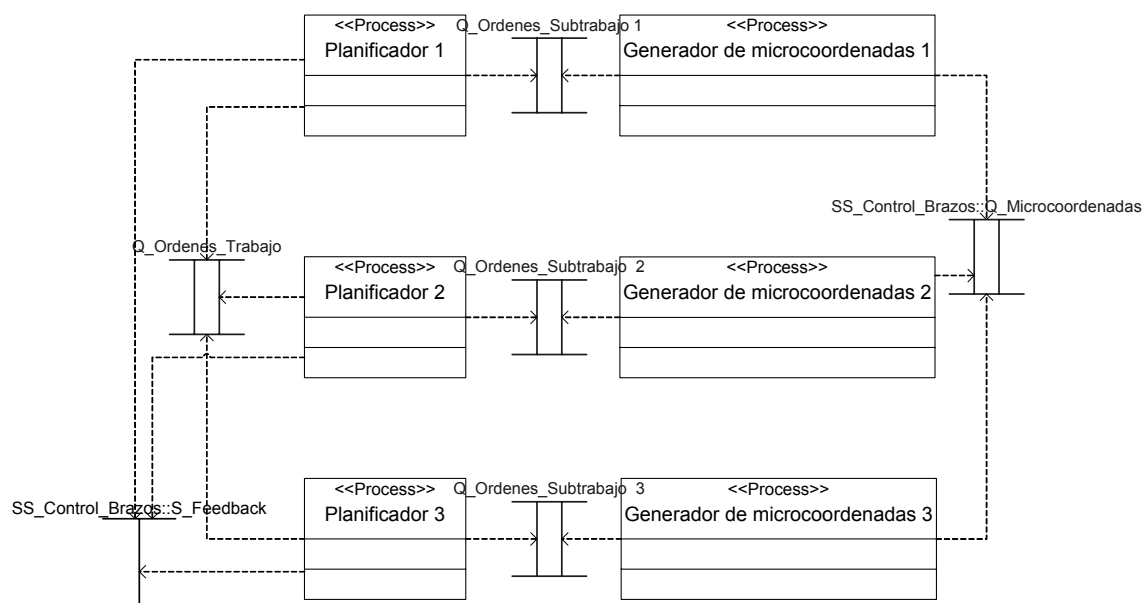


Fig. 4 - Diagrama de Arquitectura del Subsistema Planificador

Para la vista de comportamiento, en la metodología PPOOA se utiliza el concepto de CFA (Causal Flow of Activities) o flujo causal de actividades que sirve para modelar cada una de las respuestas del sistema a eventos externos, internos o temporales.



Para el sistema robótico se identifican las siguientes respuestas o CFAs: Creación de orden de subtrabajo, ejecución de orden de subtrabajo, ejecución del control de un brazo, ejecución de trabajos varios y ejecución de un servicio del sistema operativo. Por razones de espacio, sólo describiremos aquí la “creación de subórdenes de trabajo”, representada en la figura 5. El lector interesado puede encontrar el ejemplo completo en el informe técnico de la arquitectura del sistema robótico [4].

En la figura 5, se puede ver como el evento que inicia la respuesta es la existencia de una nueva orden de trabajo. A partir de este evento se ejecutan cadenas causa-efecto de actividades que son realizadas por diferentes componentes del sistema. Para mostrar que componente es responsable de la ejecución de una actividad se utilizan las particiones, también llamadas “calles de una piscina”, por el símil que muestran con éstas. Cada partición o calle muestra las actividades que realiza un componente. Esta representación es muy útil para mostrar la “asignación funcional” que es un requisito de las metodologías de la ingeniería de sistemas.

La representación del comportamiento mediante CFAs o respuestas permite el uso de métodos analíticos para evaluar el comportamiento temporal del sistema, aspecto crítico en los sistemas de tiempo real.

Los modelos estructurales y de comportamiento representados han sido desarrollados con la herramienta de ingeniería de sistemas PPOOA-Visio que hemos desarrollado. Por razones de espacio la herramienta, no se describe aquí. El lector interesado puede consultar otros artículos al respecto [3].

## 5. CONCLUSIÓN

La ingeniería de sistemas por su carácter multidisciplinar ha evolucionado desde un desarrollo basado en la documentación exhaustiva a la utilización de diversos modelos de ingeniería que utilizando notaciones estandarizadas permiten su implantación en herramientas de diseño que facilitan su uso por los ingenieros.

En el artículo se muestra un ejemplo de aplicación industrial utilizando los modelos realizados en la metodología PPOOA y la herramienta de diseño PPOOA-Visio.

La metodología PPOOA es un compromiso entre el rigor en el modelado y la facilidad de uso requerida por la industria. Esto conlleva la definición de una semántica y una notación para los modelos utilizados según dos tipos de vistas: la estructural y la de comportamiento.

Una de las ventajas de PPOOA es que mantiene la consistencia de los modelos estructurales y de comportamiento y resuelve mediante el uso de particiones, el problema de la asignación funcional tan importante en la ingeniería de sistemas.

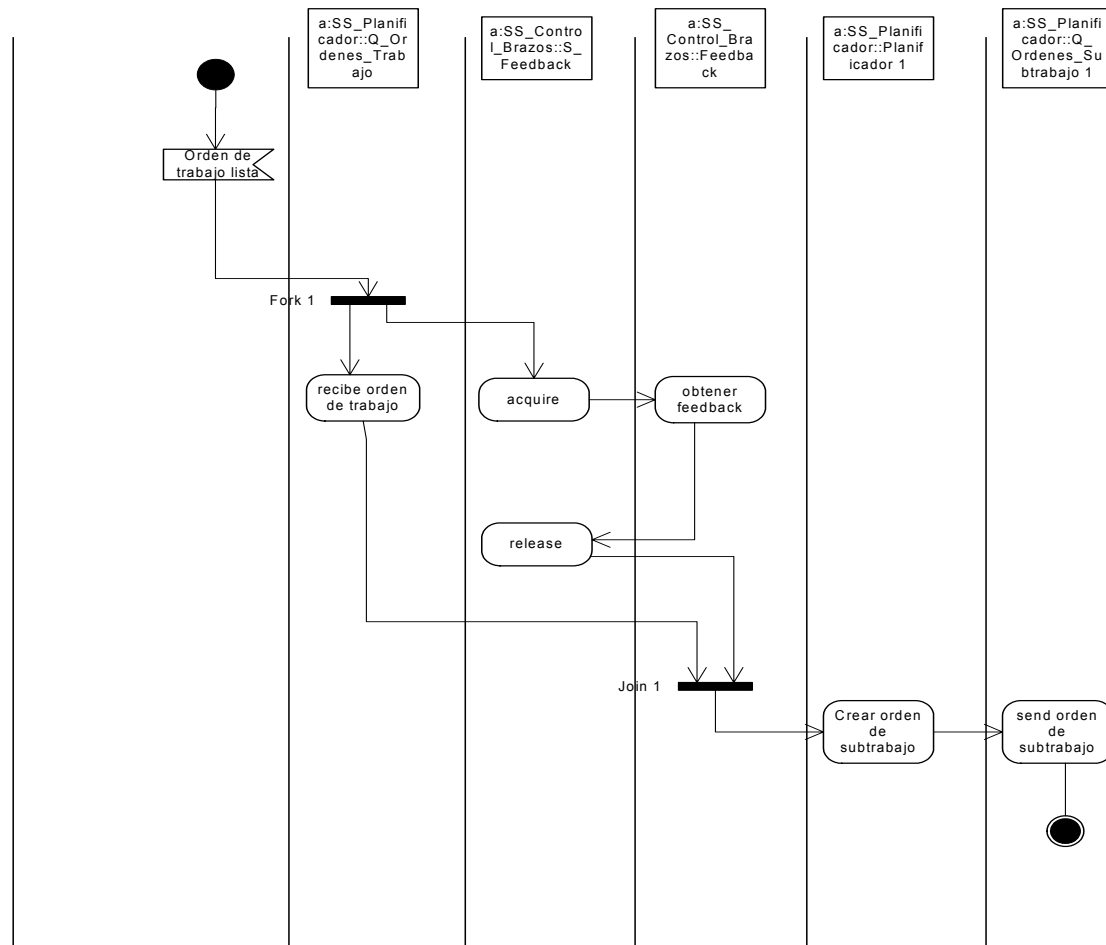


Fig. 5 - Vista de comportamiento de la “creación de un orden de subtrabajo”

## REFERENCIAS

- [1] Fernández J.L.; "An Architectural Style for Object-Oriented Real-Time Systems", 5<sup>th</sup> International Conference on Software Reuse. Victoria (Canada). IEEE 1998.
- [2] Fernández J.L.; "Método de Especificación de Requisitos para Sistemas de Información". VII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Pamplona. Octubre 2003.
- [3] Fernández J.L.; Martínez Charro J.C.; "Implementing A Real Time Architecting Method in a Commercial CASE Tool", 16<sup>th</sup> International Conference on Software and Systems Engineering (ICSSEA), Paris, December 2003.
- [4] Fernández J.L.; "Robotics Controller System". Technical Report PPOOA-TR-01\_2005. January 2005. <http://www.ppooa.com.es>
- [5] Object Management Group; "Unified Modeling Language: Superstructure". Version 2.0. July 2003. <http://www.omg.org>
- [6] Rehtin, E.; Maier, W.M.; "The Art of Systems Architecting". CRC Press, Boca Raton, FL, 1997. ISBN 0-8493-7836-2.
- [7] Sys ML Partners. SysML Specification, V 0.9. January. 2005.