

# METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE MODELOS DE SIMULACIÓN EJECUTABLES PARA SISTEMAS DE FABRICACIÓN

## METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF EXECUTABLE SIMULATION MODELS FOR MANUFACTURING SYSTEMS

---

### **Sergio Benavent-Nácher**

Estudiante de Doctorado en Tecnologías Industriales y Materiales.  
Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, (España).  
E-mail: [benavens@uji.es](mailto:benavens@uji.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-542X>

### **Fernando Romero Subirón**

Catedrático de Universidad. Miembro del grupo de investigación Ingeniería de Fabricación.  
Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, (España).  
E-mail: [fromero@uji.es](mailto:fromero@uji.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1362-3656>

### **Pedro Rosado Castellano**

Profesor Titular de Universidad. Miembro del grupo de investigación Ingeniería de Fabricación  
Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, (España).  
E-mail: [rosado@uji.es](mailto:rosado@uji.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9822-9484>

**Recepción:** 21/09/2020 **Aceptación:** 07/01/2021 **Publicación:** 15/03/2021

#### **Citación sugerida:**

Benavent-Nácher, S., Romero, F., y Rosado, P. (2021). Metodología para el desarrollo de modelos de simulación ejecutables para sistemas de fabricación. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 10(1), 49-71. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2021.v10n1e37.49-71>

## RESUMEN

En los últimos años, la adopción de los principios de la Ingeniería de Sistemas Basados en Modelos (MBSE) en el contexto de los sistemas de fabricación ha promovido el desarrollo simulaciones de alta complejidad (simulaciones híbridas, multi-escala, multi-dominio, etc.) y gran fidelidad, algunas de ellas aplicables incluso en tiempo real (prototipos y gemelos virtuales). La elevada complejidad de los sistemas de fabricación modernos hace necesario el uso de metodologías bien fundadas para orientar de forma eficaz y eficiente la definición, transformación y ajuste de los modelos de simulación. Sin embargo, se han encontrado pocas propuestas que definan metodologías adecuadas para la simulación de sistemas de fabricación. Este trabajo presenta la metodología SSM (methodology for Simulation System Modelling), basada en la utilización sinérgica de SysML y Modelica y desarrollada para soportar la construcción de modelos ejecutables de simulación multi-dominio para sistemas complejos de fabricación. Además, se presenta un caso de estudio en el que se aplicado esta metodología para la definición de modelos de simulación ejecutables de una línea de ensamblaje multi-etapa que integra aspectos de calidad geométrica y de productividad. Los resultados de este caso permiten comparar diversas lógicas de control, así como demostrar la validez de la metodología propuesta.

## PALABRAS CLAVE

Metodología, Simulación multi-dominio, Sistemas de ensamble multietapa, SysML, Modelica.

## ABSTRACT

*In recent years, the adoption of the principles of Model Based Systems Engineering (MBSE) in the context of manufacturing systems has promoted the development of highly complex (hybrid simulations, multi-scale, multi-domain, ...) and high-fidelity simulations, some of them applicable even in real time (prototypes and virtual twins). The high complexity of modern manufacturing systems requires the use of well-founded methodologies to effectively and efficiently guide the definition, transformation and adjustment of the simulation models. However, few proposals address the definition of adequate methodologies for the manufacturing systems simulation. This work presents the methodology for Simulation Systems Modeling (SSM methodology), based on the synergistic use of SysML and Modelica. This methodology has been developed to support the construction of executable and multi-domain simulation models for complex manufacturing systems. In addition, a case study is presented, where this methodology is applied to define executable simulation models of a multi-stage assembly line that integrate geometric quality and productivity aspects. The results of this case study enable to compare different control logics, as well as to demonstrate the validity of the proposed methodology.*

## KEYWORDS

*Methodology, Multi-domain simulation, Multistage assembly systems, SysML, Modelica.*

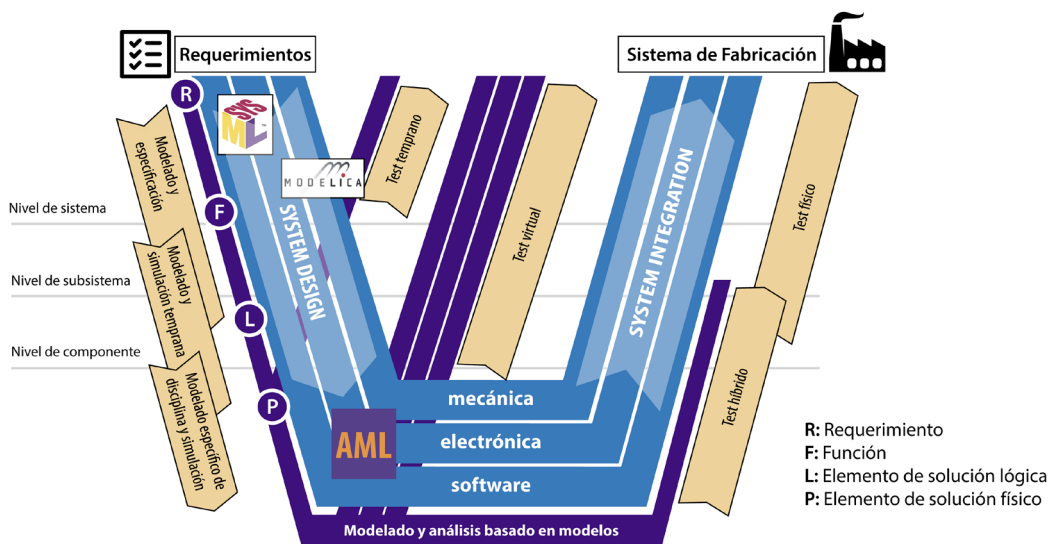
## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la complejidad de los sistemas de fabricación, impulsada por la adopción de algunas de las nuevas tecnologías y estrategias de control asociadas a iniciativas como Industria 4.0 (Alemania) o la Internet Industrial (USA), fuerza a las empresas a adoptar una Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE), sustituyendo unos procesos de ingeniería centrados en documentos por otros basados en modelos. El uso de modelos resulta especialmente ventajoso en el desarrollo de simulaciones y experimentos sobre los modelos ejecutables, entre otras muchas aplicaciones, como se indica en Johnson et al. (2011).

Este trabajo pone el foco en esta actividad de modelado y simulación (M&S), proponiendo una metodología que adopta el enfoque MBSE para el diseño del propio sistema de simulación, en concreto cuando se aborda el diseño inicial del sistema de fabricación a nivel de sistema (simulación off-line), antes de inicializar el diseño y la simulación disciplinar (mecánica, eléctrica, etc.). El modelado y la simulación durante el diseño de sistemas permite sustituir los experimentos físicos por tests virtuales, acortando de manera significativa los ciclos de diseño y reduciendo los costes (Sinha *et al.*, 2000). Además, estos modelos de simulación a nivel de sistema pueden servir de base para la creación de modelos ligeros utilizables en la simulación on-line, una línea de trabajo que está siendo objeto de muchas investigaciones, soportada por tecnologías como la del gemelo digital, que se han puesto de moda en los últimos años.

El proceso de diseño y desarrollo de sistemas de fabricación basado en modelos adoptado en nuestra propuesta se muestra en Figura 1, que representa el flujo de actividades del típico Modelo en V de la Ingeniería de Sistemas adaptado al enfoque MBSE (Fritzson, 2004; Eigner, Gilz y Zafirov, 2012). Inicialmente el modelo sólo consideraba una V (azul claro en la Figura 1), en la que la rama ascendente representa el proceso de integración de las partes y la verificación y validación, a diferentes niveles de composición, en base al ensayo de un prototipo físico. Posteriormente, con la adopción del enfoque MBSE se incorporó toda una serie de actividades adicionales relacionadas con el modelado y el análisis basado en modelos (líneas en azul oscuro). La representación en V de estos modelos de proceso nos

traslada la idea de que existe una fuerte y continua interacción entre las actividades de diseño (rama descendente) y las de verificación y validación de las soluciones (ramas ascendentes), que en estos modelos adquieren especial relevancia cuando se adopta el enfoque MBSE. Una circunstancia que se percibe visualmente, al comprobar la incorporación de nuevas ramas (azules) ascendentes, en las que los ensayos del sistema mediante simulaciones (digitales), de diferente nivel de detalle y alcance, adquieren una especial relevancia.

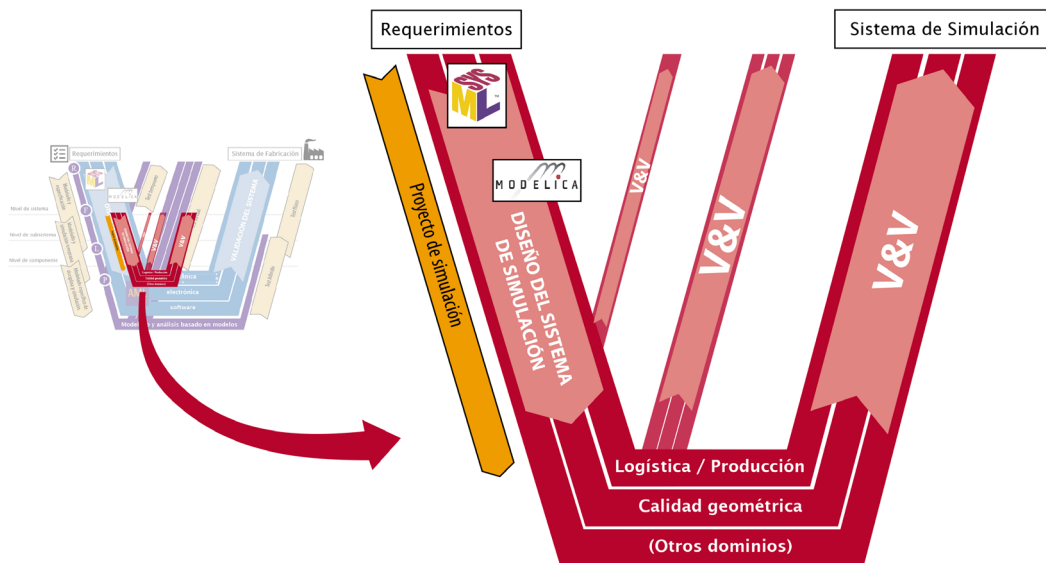


**Figura 1.** Modelo en V aplicado a sistemas de fabricación.

**Fuente:** elaboración propia, inspirado en Eigner et al. (2012).

Pero el modelo en V siempre se ha relacionado con el diseño y desarrollo del sistema físico (p. e. el de un sistema de fabricación) y en él no se visualizaba el diseño y desarrollo de los sistemas de simulación que, como sistemas, también deben estar sujetos al mismo proceso en V con el enfoque MBSE. Para resaltar esta circunstancia, con la Figura 2 se quiere indicar que cuando se realiza el modelado y la simulación temprana del sistema físico, con los correspondientes test tempranos, en paralelo se debe iniciar el proceso de diseño y desarrollo del sistema de simulación correspondiente, marcado en color

rojo sobre el modelo en V del primer proceso. Esta V, ampliada en la parte derecha de la Figura 2, contempla el desarrollo de un sistema de simulación completo, que puede llegar a integrar simulaciones de dominio de un nivel muy detallado (realista).



**Figura 2.** Modelo en V aplicado a sistemas de simulación.

**Fuente:** elaboración propia.

Ahora bien, como este trabajo se centra en la fase de M&S temprana de un sistema de fabricación (M&S a nivel de sistema) y, en concreto, en el sistema de simulación que dará soporte a la misma, nuestro foco será la fase representada por V superior izquierda. Esta fase de diseño y desarrollo de un sistema de simulación, a nivel de sistema, deberá contemplar todo el ciclo de vida del modelo de simulación (Galland, Grimaud y Campagne, 2000), compuesto por las cuatro fases típicas de las metodologías tradicionales de resolución de problemas (análisis, especificación, concepción e implementación) y por un conjunto de fases específicas del proyecto de simulación: diseño de los planes experimentales, de los

experimentos y de la estructura de los resultados. Estas fases, que se pueden identificar asociadas a la rama descendente de la Figura 2, tendrán su reflejo en la metodología propuesta.

Otro aspecto a considerar, a la hora de valorar nuestra propuesta metodológica, tiene que ver con la evolución que han sufrido las simulaciones a nivel de sistema en los últimos años. El enfoque MBSE, que ha impulsado la mejora de las capacidades de las plataformas de M&S, y el incremento vertiginoso de capacidad de procesamiento de los ordenadores han posibilitado el desarrollo simulaciones de alta complejidad (simulaciones híbridas, multi-escala, etc.) y multidominio de sistemas complejos, como es el caso de los sistemas de fabricación (Van Noten, Gadeyne y Witters, 2017). Pero este desarrollo no se ha visto acompañado por la adopción de metodologías bien fundadas que permitan que el proceso de definición, transformación y ajuste de los diferentes modelos de simulación sea eficiente y eficaz. Como se afirmaba en Galland et al. (2000) aún es poco frecuente que el desarrollo de estas herramientas de simulación esté apoyado en una metodología concreta.

Por ello, en el presente trabajo se pretende cubrir esta carencia, definiendo la metodología SSM (methodology for Simulation System Modelling). Se trata de una metodología desarrollada con el objetivo de soportar la construcción de modelos de simulación ejecutables y multi-dominio para sistemas complejos, como es el caso de los sistemas avanzados de fabricación, y que está basada, como veremos más adelante, en explotar la sinergia de dos lenguajes orientados a objetos, SysML y Modelica, bajo un enfoque MBSE.

Con este fin, el trabajo se ha organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se describe la metodología seguida para el desarrollo de este trabajo. Posteriormente, en la Sección 3, se describe la metodología SSM. Finalmente, en la Sección 4 se recogen las conclusiones del trabajo.

## 2. METODOLOGÍA

La necesidad de desarrollar la metodología, con el objetivo indicado anteriormente, surgió en el marco de una investigación más amplia dirigida a diseñar e implementar una plataforma de M&S para sistemas de fabricación multi-etapa y, en concreto, para dar soporte al desarrollo de un prototipo de M&S multidominio y multiescala que permite visualizar y evaluar las funcionalidades y modos de operación de los sistemas de ensamblaje multietapa (MAS), tanto en términos de calidad geométrica como de productividad (Benavent-Nácher *et al.*, 2020). Sin embargo, la generalidad de la propuesta permite utilizarla en el desarrollo de cualquier sistema de simulación.

La metodología para el desarrollo de la metodología SSM, nuestro objetivo, contempla cinco pasos que contienen toda una serie de tareas que interaccionan entre sí, formando un sistema dinámico. Estos pasos son:

- **Paso 1.** Revisión bibliográfica. Este primer paso se articula en dos etapas: a) una revisión general sobre el concepto de el Modelado y la Simulación de Sistemas Complejos, con una búsqueda centrada alrededor de palabras clave como Modelling and Simulation, Complex Systems, Co-simulation, MBSE Approach, Simulation Languages, Smart Manufacturing, Digital Factory o Digital Twin; y b) una revisión sobre metodologías de M&S, centradas fundamentalmente en sistemas mecatrónicos y sistemas de fabricación. Como se ha indicado, las referencias con propuestas metodológicas sobre el modelado de sistemas de simulación encontradas han sido escasas, aunque interesantes de cara a construir nuestra propuesta.
- **Paso 2.** Análisis de los lenguajes y técnicas de modelado de sistemas. En este paso se han considerado diversas alternativas de lenguajes empleados habitualmente en el M&S de sistemas complejos, especialmente en el ámbito de los sistemas de fabricación.
- **Paso 3.** Análisis del proceso de diseño de sistemas de simulación, identificando las principales etapas o tareas y la información implicada en cada una de ellas.



- **Paso 4.** En base a las conclusiones de los pasos anteriores, desarrollar y definir la propuesta metodológica.
- **Paso 5.** Evaluación de la metodología propuesta en base a su aplicación a un caso de estudio.

### 3. RESULTADOS

En base a los pasos definidos en el apartado anterior, se elaboró la metodología SSM, que se presenta en el apartado 3.2. Se trata de una metodología que responde a los requisitos, que se exponen previamente en el apartado 3.1. Finalmente, con el objetivo de validar la propuesta, en el apartado 3.3 se presenta un ejemplo de aplicación de la misma.

#### 3.1. REQUISITOS DE LA METODOLOGÍA

Para el establecimiento de los requisitos del sistema de simulación es fundamental tener en cuenta a todas las partes interesadas en este sistema, que en este caso serán los participantes en el proceso de diseño y desarrollo de sistemas de fabricación físico, básicamente ingenieros/as de sistemas, de fabricación/producción, de automatización, de calidad, etc. Esto es así porque el sistema de simulación es básico para el trabajo colaborativo, entre especialistas de diversas disciplinas, que sustenta el diseño de cualquier sistema complejo.

Según Bassi et al. (2006), cualquier metodología de diseño de un artefacto técnico, como es el caso de un sistema de simulación, además de establecer el proceso, camino para desarrollar el artefacto, debe incidir en la forma en que el sistema es descrito, es decir el modelado. Por ello, va a ser muy importante que la metodología SSM favorezca la comunicación y colaboración interdisciplinar, un aspecto que es muy importante tanto a la hora de establecer los procedimientos y lenguajes de modelado como el flujo de actividades a desarrollar y su coordinación.

Por lo que respecta al modelado, es importante valorar la oportunidad de definir modelos descriptivos como apoyo a la definición de modelos de simulación ejecutables, explorando las necesidades de integración de estos y, en concreto, las posibilidades de transformación de modelos descriptivos a ejecutables y viceversa. Otro aspecto a valorar es el enfoque, el tipo de vistas que cubre (requerimientos, estructuras, comportamiento, etc.) y la expresividad y grado de formalidad del lenguaje/s seleccionados y, especialmente los tipos de comportamiento (híbrido, multidominio, etc.) que se pueden describir. Por lo que respecta al enfoque de modelado, cabe indicar que los lenguajes de modelado orientados a objetos ofrecen una clara ventaja por lo que respecta al desarrollo, mantenimiento y reutilización de los modelos.

Teniendo en consideración todo lo comentado hasta el momento, los requisitos fundamentales adoptados para el desarrollo de la metodología SSM se pueden concretar en su capacidad para:

- Facilitar el trabajo colaborativo y multidisciplinar de todos los interesados/as en el diseño, verificación y validación del sistema físico y del sistema de simulación correspondiente, garantizando la continuidad digital (transformaciones entre modelos, etc.) desde la especificación del diseño del sistema físico hasta la verificación y validación del modelo de simulación ejecutable.
- Soportar el diseño de sistemas de simulación modulares, en base a su “componentización”, utilizando el mecanismo de instanciación de componentes de librerías. Se trata de una propiedad que, como ya se ha citado, posee la orientación a objetos.
- Abarcar todo el proceso de definición y desarrollo del sistema de simulación, desde el establecimiento de los requisitos hasta la definición de modelos de simulación ejecutables, incluyendo los procesos de soporte de este (trazabilidad, etc.).
- Ser implementable en entornos/plataformas para el modelado de sistemas, aprovechando las facilidades que éstas ofrecen para la verificación e integración de modelos.
- Modelar diferentes puntos de vista (dominios y perspectivas) y diferentes dinámicas de sistema (de eventos discretos, de dinámica continua e híbridos).

## 3.2. METODOLOGÍA PROPUESTA

### 3.2.1. PROPUESTA PARA EL MODELADO

En este apartado se define la forma en que el sistema va a ser descrito. Se ha optado por utilizar SysML y Modelica, ambos con una clara orientación a objetos, para que el proceso pueda beneficiarse de las sinergias que proporciona su uso conjunto. Los lenguajes y los métodos orientados a objetos adquieren cada día más un lugar relevante en el campo de Modelado de Sistemas, especialmente tras la aparición del Lenguaje de Modelado Unificado (UML) y el mecanismo de extensión que posee, que permite el desarrollo de lenguajes especializados o específicos de un dominio, como es el caso el Lenguaje de Modelado de Sistemas (SysML).

SysML es un lenguaje descriptivo (gráfico) para el modelado de sistemas en general que permite el establecimiento de comunicaciones formales y no-ambiguas entre ingenieros de sistemas, diseñadores y analistas de sistemas, soportando la capacidad de comunicación incluso entre personas que no sean necesariamente especialistas. SysML se ha mostrado como un lenguaje claramente válido para el diseño y modelado de sistemas complejos, como es el caso de los Sistemas de Producción Ciber-Físicos (CPPS). Además, en este momento ya son numerosas las publicaciones sobre el diseño y modelado de equipos y sistemas de fabricación en las que SysML juega un papel fundamental a la hora de integrar todos los modelos desarrollados, siendo también utilizado en el diseño de sistemas de simulación (Nikolaidou *et al.*, 2012). Esta circunstancia es relevante a la hora de integrar la especificación del sistema y su simulación.

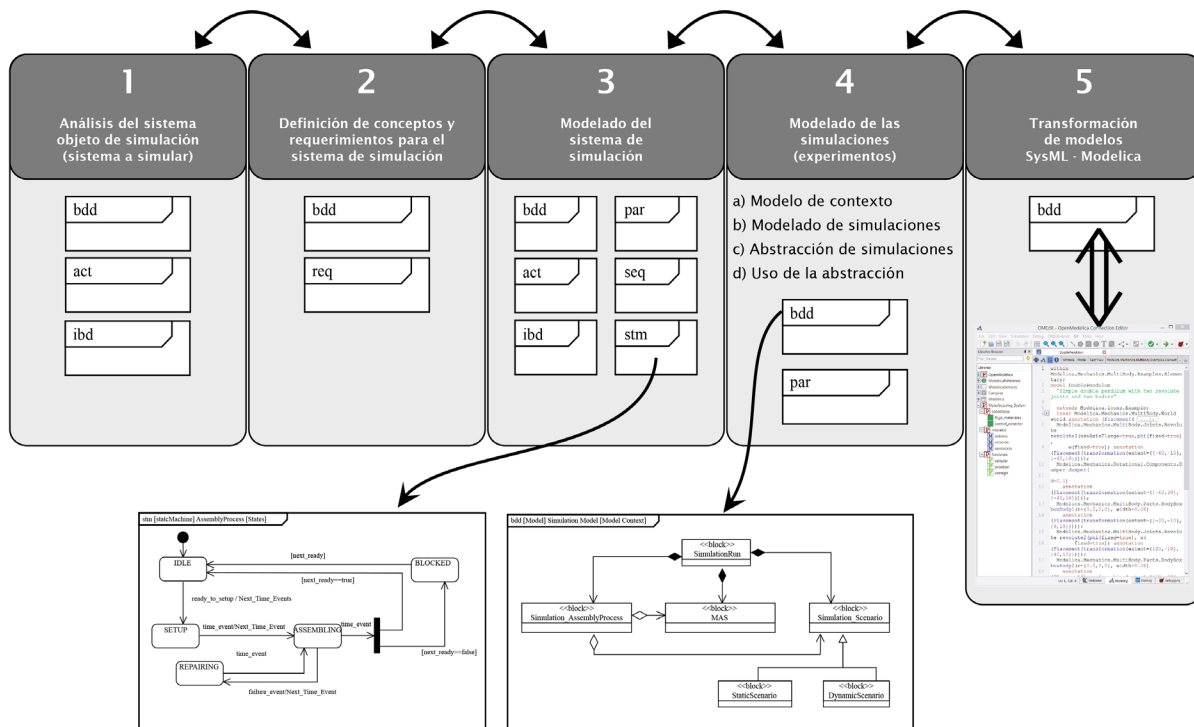
Sin embargo, aunque se están desarrollando perfiles de SysML, como ModelicaML (Schamai, 2009), el estándar actual no permite la creación de modelos de simulación ejecutables. Por ello, en la metodología propuesta, el estándar SysML se utiliza como lenguaje de diseño, para favorecer la colaboración interdisciplinar, y como base para la elaboración de los modelos ejecutables definidos con el lenguaje Modelica. Modelica es un lenguaje textual orientado a objetos que permite simular sistemas de eventos discretos y de dinámica continua, mediante el modelado de las ecuaciones que gobiernan

sus comportamientos. Se trata por tanto de un lenguaje, que de igual forma que SysML, es adecuado para tomar en consideración las restricciones en la fase de diseño conceptual bajo un enfoque MBSE. Esta capacidad de SysML para modelar restricciones ha sido utilizada en algunos trabajos para realizar modelos de dominio, como los del diseño mecánico [Penas].

Se trata de unos estándares que están soportados por diferentes entornos/plataformas de modelado (VisualParadigm, Papyrus, etc.) y simulación (Dymola, OpenModelica, etc.), tanto comerciales como de código libre, lo que facilita el diseño, implementación y uso de modelos de simulación. Entre estas facilidades destacan las funcionalidades que ayudan a verificar la corrección y consistencia de los modelos elaborados. Además, la transformación SysML-Modelica y viceversa es un campo de investigación muy activo en los últimos años, por lo que se espera que estos entornos incorporen próximamente funcionalidades que ayuden a automatizar estas transformaciones (Paredis *et al.*, 2010).

### 3.2.2. PROCESO PROPUESTO

En base a los requisitos comentados anteriormente se ha desarrollado un proceso metodológico de 5 pasos, que van más allá de la propia especificación del sistema de simulación, porque contempla su vinculación con la especificación del sistema físico a simular, también descrita con SysML. El proceso es general y, por lo tanto, aplicable al diseño de cualquier sistema de simulación, pero conviene recordar que la propuesta está orientada a simular principalmente sistemas de fabricación, siendo este el contexto que tomaremos como referencia. Además, el proceso propuesto no es estrictamente secuencial, pues contempla la posibilidad de solape de los pasos y de realimentaciones continuas motivadas por la modificación, mejora y/o ampliación del modelo. Los cinco pasos y la dinámica del proceso se muestran en la Figura 2, en la que también se aprecian el tipo de artefactos generados (diagramas, etc.) en cada uno de los pasos.



**Figura 3.** Proceso de diseño del sistema de fabricación en la metodología SSM.

**Fuente:** elaboración propia.

Por último, es importante comentar que el proceso definido a continuación, como ocurre con cualquier proceso, está condicionado por los lenguajes escogidos, SysML y Modelica. A continuación, se describen de forma más detallada cada uno de los cinco pasos que componen el proceso de la metodología SSM.

**Paso 1: Análisis del sistema a simular**

En este primer paso se realiza el análisis de la estructura funcional y lógica del sistema físico a simular, en nuestro caso el sistema de fabricación que deseamos simular. Este sistema debe ser analizado para conocer

los elementos estructurales, funcionales y su comportamiento, así como las relaciones establecidas entre ellos. El análisis del sistema se realiza en base a todas las especificaciones y en especial a los diagramas SysML que lo describen: Diagramas de casos de uso (uc), Diagramas de actividad (act) y Diagramas de definición de bloques (bdd). En muchos casos este análisis puede comportar la ampliación y modificación de diagramas, asegurando su adecuación con las métricas a considerar en el sistema de simulación.

Algunas construcciones de estos modelos (bloques, etc.) aparecerán en el Diagrama de Contexto del sistema de simulación (nuestro sistema de interés), que se define en el paso 4. Por ello es importante comprobar que estas construcciones contengan todos aquellos atributos que se vinculan con las medidas de efectividad y con las metas impuestas con el objetivo de dar cumplimiento a los requerimientos establecidos para el diseño del sistema a simular.

## **Paso 2: Conceptos y requisitos para el sistema de simulación**

El segundo paso se centra en la definición de los conceptos y requisitos del sistema de simulación. En función del tipo de sistema que se quiere simular y de las metas y medidas de efectividad establecidas, el diseñador/a puede definir varios conceptos alternativos que sustenten el diseño del sistema de simulación (p. e. los aspectos a integrar -logístico/producción, calidad del producto, salud de los equipos, ... -, el paradigma de simulación, etc.) y posteriormente los requisitos para cada uno de ellos. En este paso los artefactos creados son Diagramas de casos de uso, Diagramas de requisitos (req) y Diagramas de definición de bloques.

## **Paso 3: Modelado del sistema de simulación**

A partir de los conceptos establecidos en el paso anterior, se selecciona una solución viable para la estructura de objetos y para el comportamiento prescrito del sistema de simulación. Las descripciones de estructura y comportamiento se descomponen al nivel de abstracción requerido y adecuado a las metas y métricas establecidas. Cabe destacar que en este caso la naturaleza del comportamiento, y por tanto su modelado, depende en gran medida del sistema a simular, pudiendo abarcar desde eventos

discretos a dinámicas continuas o incluso combinaciones de éstos (simulaciones híbridas). En este paso, los artefactos creados para la estructura son Diagramas de definición de bloques, y Diagramas de bloques internos (ibd), mientras que la definición del comportamiento viene descrita por Diagramas de actividades, Diagramas paramétricos (par), Diagramas de secuencia (sec), Diagramas de máquina de estados (stm), etc.

#### **Paso 4: Modelado de las simulaciones**

En este paso, a partir del modelo de simulación se establece cómo utilizarlo para simular el sistema físico. Para ello, el sistema de simulación se debe relacionar con otra información de diseño como el modelo del sistema físico, los datos de los escenarios de simulación, las metas perseguidas, etc. Para ello se establecen las siguientes tareas:

- a) La definición de un modelo de contexto, donde los elementos del sistema de simulación se vinculan con los elementos correspondientes del sistema a analizar para preservar la consistencia entre todos los modelos.
- b) El modelado de las simulaciones, definiendo las ejecuciones de simulación a realizar según los escenarios considerados.
- c) La abstracción de la simulación, definiendo las medidas de eficacia y la agregación de los resultados.
- d) El uso de la simulación abstraída en el contexto de la optimización del diseño, relacionándolas con los requisitos de las partes interesadas y los objetivos para las medidas de eficacia señaladas en el modelo del sistema a analizar (paso 1).

### **Paso 5: Transformación de modelos SysML-Modelica**

Para obtener un modelo de simulación ejecutable, todas las descripciones del sistema previas deben implementarse utilizando un lenguaje con esta capacidad, como es Modelica. Sin embargo, no es suficiente con trasladar los modelos a un nuevo lenguaje, sino que es necesario incrementar el nivel de detalle añadiendo algunos parámetros y relaciones que permitan la ejecución del modelo.

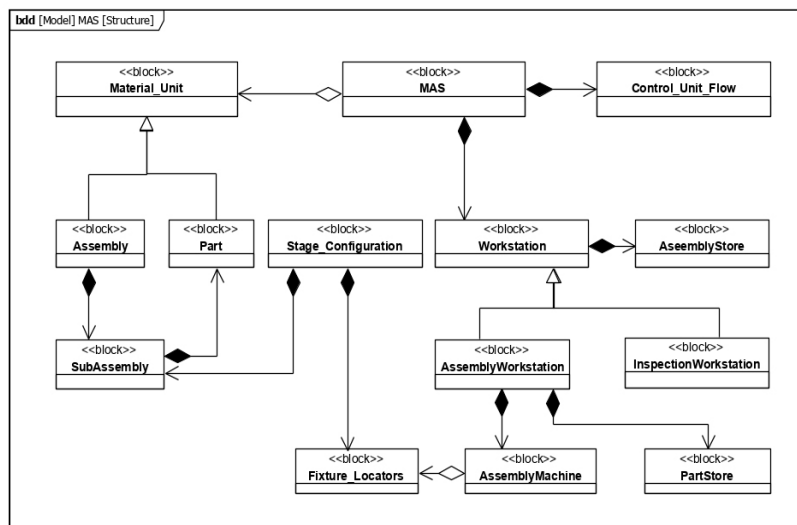
Como se ha comentado anteriormente, el proceso descrito no es estrictamente secuencial, sino que considera flujos de realimentación para modificar, mejorar y/o ampliar el modelo. Una vez completados todos los pasos se dispondrá de un modelo ejecutable que es necesario validar, por ejemplo, mediante una instanciación que permita su ejecución. De esta forma se puede contrastar la fidelidad del modelo de simulación con respecto al comportamiento del sistema a simular y el cumplimiento de los requerimientos establecidos en el paso 2.

### **3.3. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA**

A continuación se presenta la aplicación de la metodología SSM para la elaboración del modelo de simulación de un sistema de ensamble multi-etapa (MAS) (Benavent-Nácher *et al.*, 2020). Se trata de un sistema de simulación multi-dominio que considera tanto el flujo de materiales y órdenes como la propagación de las características de calidad de las piezas. Por cuestiones de espacio solo se presentan algunos de los resultados de esta aplicación, deteniéndonos en los pasos 3, 4 y 5 de la propuesta.

En el primer paso de la metodología se realiza el análisis de la estructura funcional y lógica del sistema a simular (MAS). Atendiendo a las características del MAS se modeló su estructura, representada en el diagrama de bloques de la Figura 4. En él se pueden observar los diferentes elementos que constituyen el sistema (ensamble, subensamble, pieza, estación de trabajo, estación de ensamble, estación de inspección, etc.) y las relaciones entre ellos.





**Figura 4.** Diagrama de bloques. Estructura del MAS para simular.

**Fuente:** elaboración propia.

Seguidamente, en el paso 2 se definieron algunos requerimientos del sistema de simulación. Uno de los principales requerimientos considerados es la adopción del formalismo para simulación de eventos discretos (DEVS). En base a estos requerimientos, se abordó el paso 3, definiendo el modelado estructural y de comportamiento del sistema de simulación. Como resultado de este modelado se muestra, por ejemplo, el diagrama de bloques de la Figura 5, en el que se define la estructura del sistema de simulación, y el diagrama de máquina de estados de la Figura 6. Cabe señalar que en este caso el sistema a simular tiene un comportamiento discreto que se ha descrito a través de los correspondientes diagramas de máquina de estado.

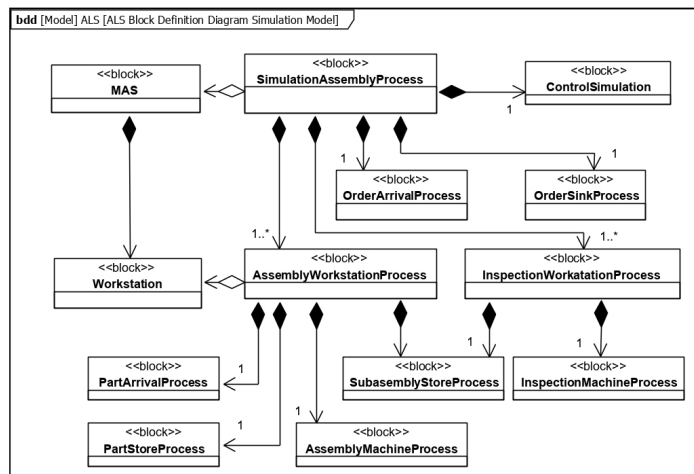


Figura 5. Diagrama de bloques. Estructura del sistema de simulacion.

Fuente: elaboración propia.

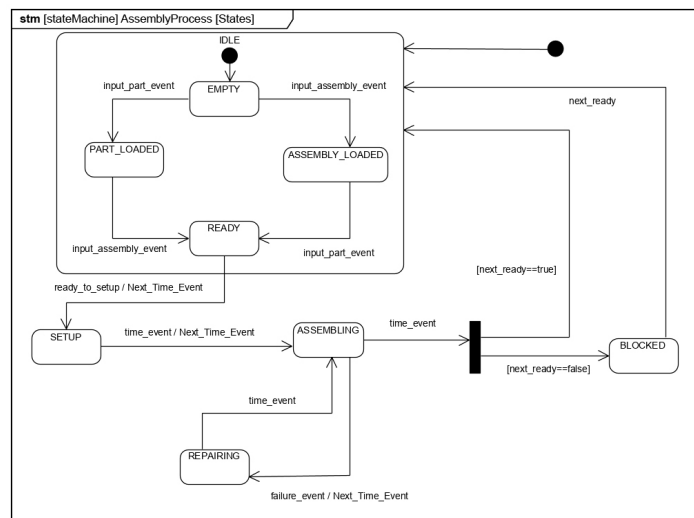
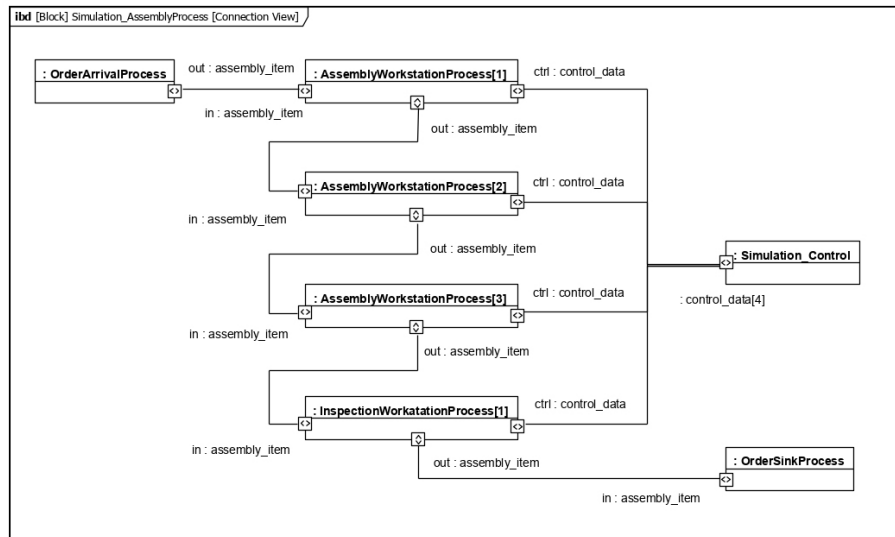


Figura 6. Diagrama de máquina de estados. Proceso de una estación de ensamble.

Fuente: elaboración propia.

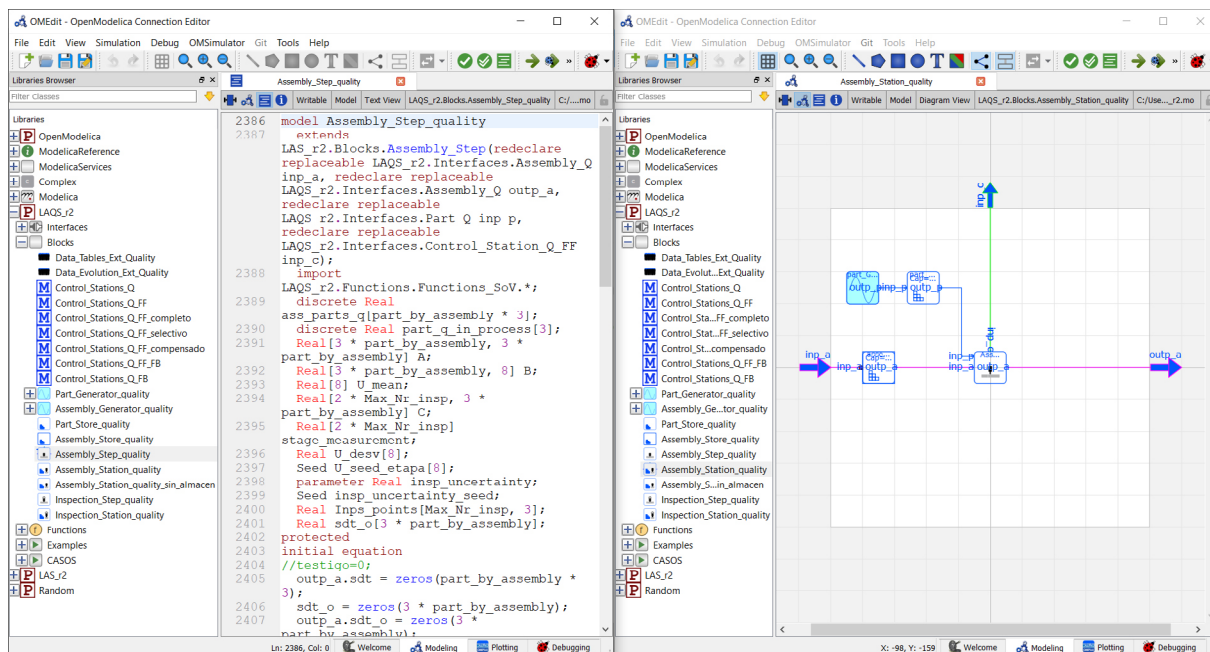
A continuación, como parte del paso 4, se definieron las simulaciones y el sistema de simulación, del que se muestra el Diagrama de bloques internos en la Figura 7. En él se puede apreciar la estructura de la instancia de línea de ensamble (MAS) simulada, formada por cuatro etapas de proceso (tres de ensamble y una etapa de inspección final), un proceso de control y los procesos de llegada y salida de órdenes.



**Figura 7.** Diagrama de bloques internos. Estructura interna del proceso de ensamble.

**Fuente:** elaboración propia.

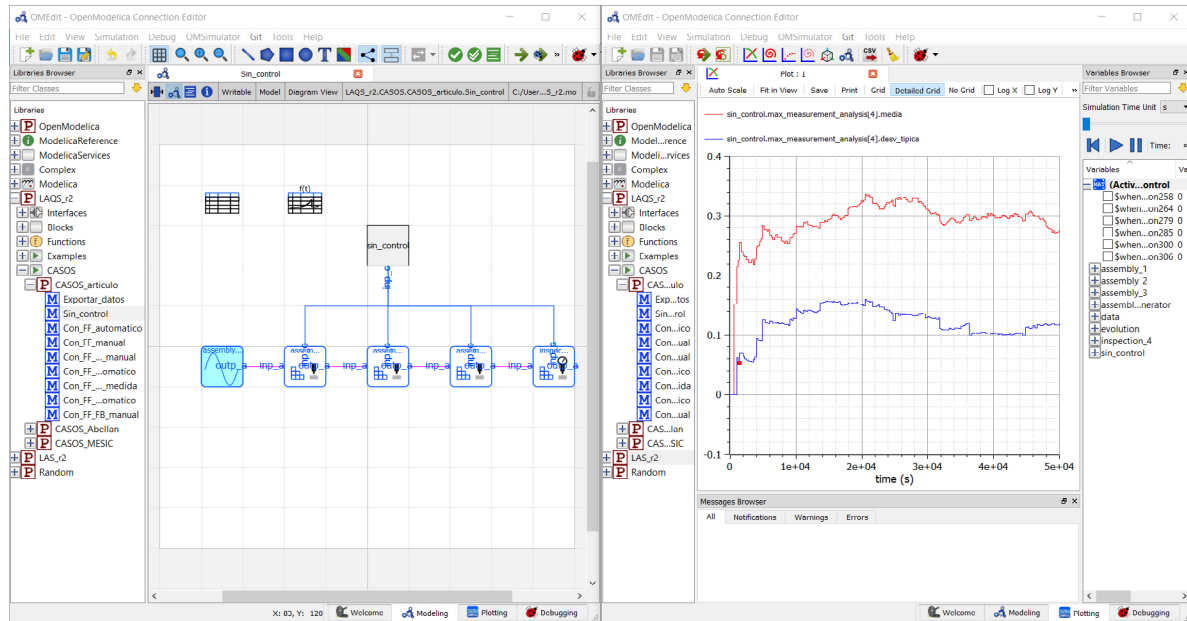
Finalmente, en el paso 5 se trasladaron todos los modelos SysML al lenguaje Modelica, desarrollando una implementación sobre OpenModelica para obtener los modelos de simulación ejecutables. La Figura 8 muestra dos capturas de pantalla de OpenModelica en las que se pueden apreciar los modelos implementados, tanto en su versión textual como a través de la vista gráfica.



**Figura 8.** Modelos implementados en OpenModelica. a) Modelo textual; b) Vista gráfica.

**Fuente:** elaboración propia.

Tras completar la implementación del modelo de simulación se procedió a validarlo mediante su instanciación para simular la línea de ensamble de 4 etapas, pudiéndose comprobar que tanto la construcción como la ejecución del modelo de simulación ejecutable fueron exitosas. También se pudo contrastar que el comportamiento y resultados obtenidos cumplían con los requisitos fijados. La Figura 9 muestra dos capturas de OpenModelica con la vista gráfica del modelo de simulación de la línea de ensamble y un ejemplo de los resultados obtenidos en la simulación.



**Figura 9.** Validación mediante instanciación del modelo para una línea de ensamble de 4 etapas. a) Línea de ensamble (vista gráfica); b) Ejemplo de resultados obtenidos.

**Fuente:** elaboración propia.

## 4. CONCLUSIONES

Para el diseño de sistemas de simulación resulta fundamental la adopción de metodologías bien fundadas, de manera que el proceso de definición, transformación y ajuste de los diferentes modelos sea eficiente y eficaz. Sin embargo, son pocas las propuestas que abordan esta cuestión desde un punto de vista metodológico. Por ello, se ha propuesto la metodología SSM (methodology for Simulation System Modelling). Esta metodología propone un proceso en cinco pasos y se beneficia de la utilización sinérgica de SysML y Modelica, aunque todavía son necesarios esfuerzos de integración entre estos lenguajes. La propuesta metodológica se ha validado mediante su aplicación al diseño y desarrollo de un sistema para la simulación de un determinado tipo de línea de ensamblaje multi-etapa. Los resultados obtenidos han

sido satisfactorios, tanto en el modelado del sistema de simulación como en los resultados de las diversas simulaciones ejecutadas, y muestran la adecuación de la metodología SSM.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de la Generalitat Valenciana a través de la ayuda con referencia ACIF/2019/095.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bassi, L., Secchi, C., Fantuzzi, C., y Bonfe, M.** (2006). An object-oriented approach to manufacturing systems modeling. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 442-447. <https://doi.org/10.1109/COASE.2006.326922>
- Benavent-Nácher, S., Rosado, P., Romero, F., y Abellán-Nebot, J. V.** (2020). Multidomain Simulation Model for Analysis of Geometric Variation and Productivity in Multi-Stage Assembly Systems. *Applied Sciences*, 10(18), 6606.
- Eigner, M., Gilz, T., y Zafirov, R.** (2012). *Interdisciplinary Product Development - Model Based Systems Engineering* <https://www.plmportal.org/en/research-detail/interdisciplinary-product-development-model-based-systems-engineering.html>
- Fritzson, P.** (2004). *Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. Wiley IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/9780470545669>
- Galland, S., Grimaud, F., y Campagne, J. P.** (2000). Methodological approach for distributed simulation: general concepts for MA MA-S. In *European Simulation Multiconference on Simulation and Modelling: Enablers for a Better Quality of Life*, 77-82.

- Johnson, T., Kerzhner, A., Paredis, C. J. J., y Burkhart, R.** (2011). Integrating Models and Simulations of Continuous Dynamics Into SysML. *ASME Journal of Computing Information Science in Engineering*, 12(1), 011002. <https://doi.org/10.1115/1.4005452>
- Nikolaidou, M., Kapos, G., Dalakas, V., y Anagnostopoulos, D.** (2012). Basic guidelines for simulating SysML models: An experience report. In *7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, 95-100. <https://doi.org/10.1109/SYSoSE.2012.6384172>
- Paredis, G. J. J., Bernard, Y., Burkhart, R. M., de Koning, H.-P., Friedenthal, S., Fritzson, P., Rouquette, N. F., y Schamai, W.** (2010). An overview of the SysML-Modelica transformation specification. *INCOSE International Symposium*, 20(1), 709-722. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2010.tb01099.x>
- Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S., y Hammadi, M.** (2016). Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems. *Computers in Industry*, 86, 52-69. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>
- Schamai, W.** (2009). *Modelica modeling language (ModelicaML): A UML profile for Modelica*. Linköping University Electronic Press.
- Sinha, R., Paredis, C. J. J., Liang, V., y Khosla, P. K.** (2000). Modeling and Simulation Methods for Design of Engineering Systems. ASME. *Journal of Computing Information Science in Engineering*, 1(1). 84–91. <https://doi.org/10.1115/1.1344877>
- Van Noten, J., Gadeyne, K. y Witters, M.** (2017). Model-based Systems Engineering of Discrete Production Lines Using SysML: An Experience Report. *Procedia CIRP*, 60, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.018>