Cod. 9394 | Ciencia de los ordenadores | 1203.26 Simulación

Procedimiento de simulación por eventos discretos para crear un gemelo digital de sistemas de producción complejos y automatizados

Discrete event smulation procedure to build the production digital twin of highly automated and complex production systems

Itziar Ricondo-Iriondo[1], Arkaitz Uriarte-Zearra[1] y Alaitz Kortabarria-Igartua[2]

[1] Centro Tecnológico Ideko, Dpto. de Procesos de Fabricación. Arriaga industrialdea 2 - 20870 Elgoibar, Gipuzkoa (España).

[2] Universidad de Mondragón. Dpto. de Mecánica y Producción Industrial. Loramendi 4 - 20500 Mondragón, Gipuzkoa (España).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9394

1. INTRODUCCIÓN

El entorno económico y fabricación actual se caracterizan por una creciente incertidumbre y complejidad, factores que determinarán el diseño de los sistemas de fabricación del futuro. La complejidad de los sistemas productivos puede observarse en las siguientes características [1]: 1) mayor variabilidad de producto, 2) ciclos de vida de producto cada vez más cortos, 3) rutas de producto variables, 4) minimización del tamaño de lote, 5) equipos y procesos flexibles, y 6) automatización avanzada y sistemas de control más inteligentes.

Ante estas necesidades, los fabricantes y proveedores de soluciones avanzadas en el sector de fabricación discreta señalan como elementos críticos para la fabricación del futuro la digitalización, la simulación y la automatización, tanto a nivel de equipo como en líneas completas. Las soluciones constan de una serie de equipos, los elementos de manipulación y el sistema de control, con objeto de proporcionar una solución completa a un producto (p.e., llantas de automoción, ejes de ferrocarril). Los sistemas de fabricación complejos son gestionados con sistemas de control de alto nivel, que toman decisiones, controlan órdenes de fabricación y supervisan el comportamiento de los diferentes componentes y máquinas.

Los fabricantes de estos sistemas de fabricación llave en mano necesitan considerar todos estos factores en el diseño de la solución completa, para lo cual hacen uso de diferentes herramientas de simulación. La simulación por eventos discretos (conocida por su acrónimo en inglés DES, *Discrete Event Simulation*) se ajusta bien a la simulación de entornos productivos complejos [2],[3] y puede utilizarse como herramienta de validación del diseño del sistema desde el punto de vista productivo.

Sin embargo, la utilización de la simulación y construcción de gemelos digitales va más allá de la fase de diseño de la solución. Los fabricantes de estos sistemas se encuentran inmersos en una estrategia de servitización [4], con el objetivo de ofrecer productos y servicios que les permitan dar soluciones diferenciadoras a los clientes a lo largo del ciclo de vida. En este contexto, el gemelo digital productivo permitirá ofrecer servicios orientados a la mejora productiva en la fase de uso de la instalación.

El gemelo digital une el mundo virtual con el sistema real, utilizando para ello las tecnologías digitales promulgadas por la Industria 4.0. Si bien es un término de uso cada vez más frecuente en la industria, a nivel académico el concepto es relativamente nuevo. Este artículo se centra en el gemelo digital productivo y aporta un procedimiento de simulación por eventos discretos su construcción, en sistemas de producción complejos y altamente automatizados.

El artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se revisa el estado del arte relacionado con el gemelo digital de producción, así como de los elementos que lo componen. En la sección 3 se describe el procedimiento para el desarrollo del gemelo de producción. En el apartado 4 se presenta un caso de uso, relacionado con el gemelo digital de una línea automatizada para la producción de ejes de ferrocarril. Por último, el apartado 5 contiene las conclusiones del trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años proliferan en el entorno industrial y académico términos como la Fábrica Digital, la Industria 4.0. y Gemelo Digital. El concepto de Gemelo Digital aúna las tecnologías de la Fábrica Digital e Industria 4.0, uniendo el mundo virtual y el mundo físico. Se comienza por definir el Gemelo Digital, para continuar con el despliegue de los diferentes elementos que lo componen. De entre las diferentes definiciones que se han dado del Gemelo Digital [5] desde su primera utilización por Grieves en 2003, en este artículo se utilizará la propuesta por Stark [6], que afirma que "un gemelo digital es la representación digital de un activo único (producto, máquina, servicio, sistema producto-servicio) que replica sus propiedades, condición y comportamiento por medio de modelos, información y datos". Los elementos que componen el Gemelo Digital según [6] son el Modelo Digital (el modelo, *Digital Master Model*), la Sombra Digital (los datos del sistema real, *Digital Shadow*) y su unión (Fig.1). Conceptualmente, el Modelo Digital estaría relacionado con la Fábrica Digital, que se basa en el conjunto de herramientas software y metodologías que permitan diseñar, simular, iniciar y optimizar los productos y sus sistemas de producción [7]. El segundo gran elemento del Gemelo Digital es la Sombra Digital, construida por los datos adquiridos por las tecnologías de Industria 4.0 (OPC-UA, Big Data) [8,9,10]. El Gemelo Digital

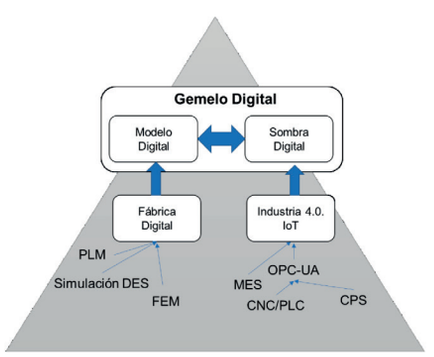


Fig. 1. Concepto Gemelo Digital. Elaboración propia basado en concepto [6]

de fabricación ofrece la oportunidad de simular y optimizar el sistema productivo para incrementar la competitividad, productividad y eficiencia [10].

La simulación es un elemento clave dentro del Gemelo Digital. Dentro de las herramientas de simulación, DES es una técnica de aplicación en entornos de producción y logística, con aplicaciones como: validación de conceptos productivos [11], mejora y optimización de flujos productivos [12], planificación de producción y control [10]. La Simulación Basada en la Optimización permite encontrar la solución óptima o casi-óptima en el caso de objetivos en conflicto. En la literatura existen publicaciones que muestran los beneficios de combinar la simulación con la optimización de líneas [3,12], mediante la utilización de heurísticos evolutivos como los algoritmos genéticos.

El nivel de detalle de la simulación depende del alcance y los objetivos a conseguir. Para simulaciones a alto nivel (nivel sistémico, interfaces entre plantas, redes de producción), algunos autores proponen la modelización agregada [3], con objeto de reducir el tiempo de desarrollo de modelo e introducción de datos. La modelización detallada permite describir comportamientos más realistas, aunque con un incremento de tiempo y coste [13]. La modelización DES propuesta en este artículo se enmarca en la modelización detallada, y el alcance se establece desde el nivel de célula hasta planta.

Uno de los problemas para la utilización de DES ha sido el tiempo y coste de adquisición de los datos para alimentar los modelos [14] y la calidad de los datos [15. Senington [16] propone un enfoque de datos vinculados para la extracción automática de datos e información para alimentar modelos de simulación de plantas. Precisamente, el Gemelo Digital se basa en la conexión de los datos reales del sistema físico sobre el modelo digital, realizándose esa tarea de manera automatizada.

Como resultado del estado del arte, puede concluirse que el concepto en desarrollo del Gemelo Digital aúna tecnologías que ya se utilizaban de manera aislada, incidiendo en la conectividad y automatización en la conectividad. Este artículo contribuye al estado del arte en proponer una metodología de desarrollo del gemelo digital productivo, profundizando en la modelización detallada por eventos discretos, y concluye con la exposición de un caso de uso.

3. PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN POR EVENTOS DISCRETOS PARA CREAR UN GEMELO DIGITAL

En este apartado se desarrolla el procedimiento para crear el gemelo digital productivo. El procedimiento se ha dividido en 3 etapas: 1) definición del alcance del gemelo digital de producción, 2) desarrollo del modelo digital, 3) desarrollo de la sombra digital. La etapa 2 y 3 pueden realizarse en paralelo.

Definición del alcance del gemelo digital

A nivel operativo y en el marco de cada proyecto, el equipo de desarrollo del proyecto debe definir el alcance del gemelo digital, que incluirá: a) definición de funcionalidades del modelo digital, b) definición de funcionalidades de la sombra digital, variables e indicadores a monitorizar y visualizar, fuentes de datos (p.e. PLC, CNC, MES), c) automatización en el flujo de datos ente el modelo digital y sistema real. Esta etapa es crítica para el desarrollo de las etapas posteriores.

Desarrollo del modelo digital basado en DES

El modelo digital debe representar los elementos del sistema productivo real**.** Basándose en los elementos críticos de los sistemas de producción, se ha desarrollado una clasificación de los elementos a considerar en una modelización detallada (Tabla I) para soluciones altamente automatizadas. La selección de los elementos se ha basado en los objetos principales identificados en soluciones llave en mano en sistemas discretos. Para cada elemento se mencionan aspectos que hay que modelizar. En el elemento de equipos de manipulación, se han listado las configuraciones más utilizadas como son los robots, las grúas pórtico, los vehículos autoguiados (en inglés conocido por AGV, *Automated Guide Vehicle*) y transportadores. La lógica que determina la interacción entre el equipo de manipulación y uno o varios equipos de fabricación debe ser también modelizada en detalle.

Se propone la integración del desarrollo del modelo digital DES dentro del proceso de diseño y desarrollo de estas soluciones complejas. Para ello, el experto en simulación interacciona con los equipos de diseño, proceso y automatización, fomentando la colaboración entre las diferentes disciplinas. De hecho, el desarrollo del gemelo digital implica un enfoque de ingeniería de sistemas y colaboración desde el inicio entre los diferentes actores del desarrollo. El papel de los diferentes equipos se describe a continuación. El equipo de proceso proporciona el diagrama de flujo que considera las operaciones a realizar, así como la información de tiempos (tiempos de ciclo, tiempos de carga), pérdidas de productividad (cambios de herramienta, cambio de referencia, paradas) y recursos necesarios, para cada uno de los equipos en las operaciones señaladas. El equipo de diseño aporta la disposición espacial de los equipos. El equipo de automatización proporciona el modelizador DES la lógica de manipulación, incidiendo en aspectos detallados como la prioridad de diferentes operaciones o el algoritmo que determina el movimiento a realizar por el manipulador. Diferentes estrategias de manipulación pueden tener un impacto significativo en el rendimiento de la solución, por lo que el modelo DES se presenta como una herramienta muy importante para validar las lógicas de control.

El uso primero del modelo digital se halla en la fase de diseño y desarrollo de la solución. Sin embargo, el desarrollo del gemelo digital para ofrecer servicios al cliente implica productizar el modelo, creando los interfaces y realizando las modificaciones pertinentes para que el modelo sea utilizable y amigable por el usuario final, cumpliendo las funciones definidas.

Desarrollo de la sombra digital

La sombra digital se forma al recoger la información desde los controladores de máquina y sensores en la fase de operación. La sombra digital conforma la historia y trazabilidad del sistema real, así como su conexión al modelo digital. En la fase de diseño los ingenieros de automatización e ingenieros de datos deben definir las variables a adquirir y monitorizar desde los diferentes equipos e integrarlos en una plataforma de adquisición datos, considerando también la forma en la que estos datos serán tratados y visualizados para ofrecer servicios. La ventaja para los fabricantes de estas soluciones es que los automatistas tienen un mayor control y acceso sobre las variables a monitorizar en sus máquinas. Además, deben seleccionarse las variables que se utilizarán para alimentar el modelo virtual y su conectividad con el modelo.

4. CASO DE ESTUDIO: LÍNEA DE FABRICACIÓN DE EJES DE FERROCARRIL

Como demostración del gemelo digital productivo se muestra una línea de fabricación de ejes de ferrocarril, que incluye las operaciones de identificación/

Elemento	Atributos y controles para modelizar
Pieza	– Estructura de pieza. – Definición de cada componente y sus variantes. – Definición de tipos de fallos de pieza y su probabilidad (calidad e inspección). – Rutas asociadas a las piezas.
Equipo de Fabricación	– Tipología de equipo: manual, semiautomático, automático. – Tiempos de ciclo por pieza. – Parámetros de fallos, intervalos y duración de fallos (mantenimiento preventivo y correctivo). – Parámetros de configuración: capacidad, tiempo de carga/descarga. – Cambios de referencia, dependencia entre cambios entre piezas. – Consumo de herramienta, que pueden ser función del equipo y de la pieza (diferentes herramientas y consumos por pieza en un mismo equipo). – Consumo energético.
Equipo de Manipulación	– Tipología de objeto de manipulación: robot (con una o varias pinzas), grúa pórtico lineal (con uno o varios manipuladores), grúa pórtico de área (con uno o varios manipuladores), vehículos autoguiados, trasportadores… – Parámetros de configuración: capacidad, tiempo de carga/descarga, velocidad, consumo energético.
Control	– Planificación y control de la producción. Tamaños de lote. – Lógica de los elementos de manipulación. – Gestión de solicitudes de manipulación. – Control de estados de equipos. – Control de estados de órdenes de fabricación. – Control de colisiones y tráfico.
Organización de la Producción	– Órdenes de fabricación. – Turnos, calendarios y recursos. – Personas.
Datos Estructurales	– Plano del sistema: disposición de elementos máquina, manipulación y buffer.

Tabla I: Clasificación de elementos a considerar el modelo detallado DES

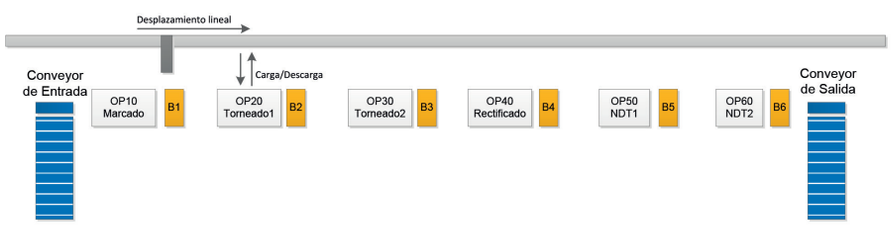


Fig. 2: Diseño esquemático de la línea

marcado, fabricación (torneado y rectificado) e inspección no destructiva. Esta línea ha sido desarrollada por un fabricante de máquinas herramienta localizado en el norte de España que ofrece soluciones completas y automatizas. La línea se ha representado en la *Fig. 2* y está compuesta por 6 máquinas, puesto de entrada, puesto de salida, un pórtico lineal para la manipulación de la pieza y un buffer entre cada una de las máquinas.

Las herramientas principales utilizadas en el desarrollo del gemelo digital han sido Tecnomatix Plant Simulation para para el modelo digital, Facts Analyzer de Evoma para la optimización multi-objetivo y Savvy Data Systems como sistema de adquisición y plataforma digital. La conectividad con el modelo digital se ha realizado mediante una interfaz con la plataforma digital que adquiere los datos y realiza el tratamiento para ponerlos a disposición del modelo digital.

En cuanto a las características de la línea de fabricación, se sigue un flujo unidireccional, aunque no todas las referencias tienen que pasar por todas las operaciones (cada referencia tiene su ruta). Las órdenes de fabricación se reciben desde el sistema de planificación de la empresa y se trabaja con órdenes de diferentes tamaños (menores a 50 unidades). La línea permite cambios de referencia dinámicos, esto es, puede realizarse el cambio de referencia de una máquina mientras otras máquinas continúan en funcionamiento. El modelo digital basado en DES ha replicado el funcionamiento de la línea, modelizando en detalle la lógica del funcionamiento del pórtico.

El sistema de control del pórtico establece unos requisitos para la realización de los movimientos, evalúa el estado de los equipos origen y destino, asigna prioridades a los tipos de movimientos y, por último, comanda y controla la ejecución de los movimientos. El diagrama de flujos que determina esta lógica se muestra en la *Fig. 3*, mientras que en la Fig. 4 se muestra su programación en la herramienta de modelización y el del interfaz de simulación. La manera de programar en la herramienta de simulación es mediante el desarrollo de objetos personalizados que reflejan tanto el flujo de material como su comportamiento (mediante variables y métodos).

El modelo digital se desarrolló durante la fase de diseño detallado de la línea. El equipo que participó en el desarrollo del modelo estuvo compuesto por técnicos de proceso, diseño, automatización y DES, lo cual permitió un mejor entendimiento a la hora de definir la solución.

La primera utilización del modelo digital fue la validación del diseño en las condiciones de contrato. El modelo se simuló durante un año de producción y se realizaron 5 réplicas, con objeto de validar el cumplimiento de los requisitos de producción en condiciones estocásticas. Se simuló una secuencia de ejes de entrada según especificaciones del cliente, con 5 referencias (y un porcentaje estimado para cada una de las referencias) y un tamaño de lote de 25 unidades.

Además, la simulación se completó con un análisis de optimización, con el objeto de determinar cuáles serían las medidas más efectivas de mejora para incrementar la producción. Para ello se utilizó la

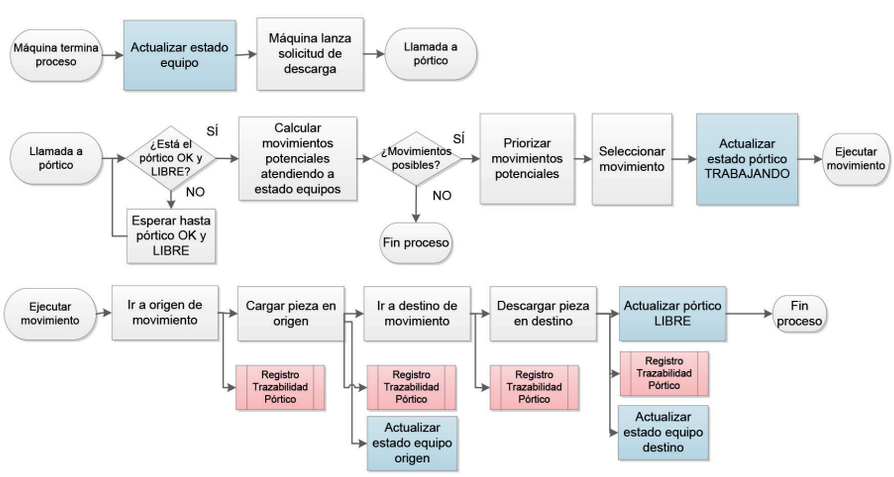


Fig. 3: Diagrama de flujo de control del pórtico tras solicitud de descarga de máquina

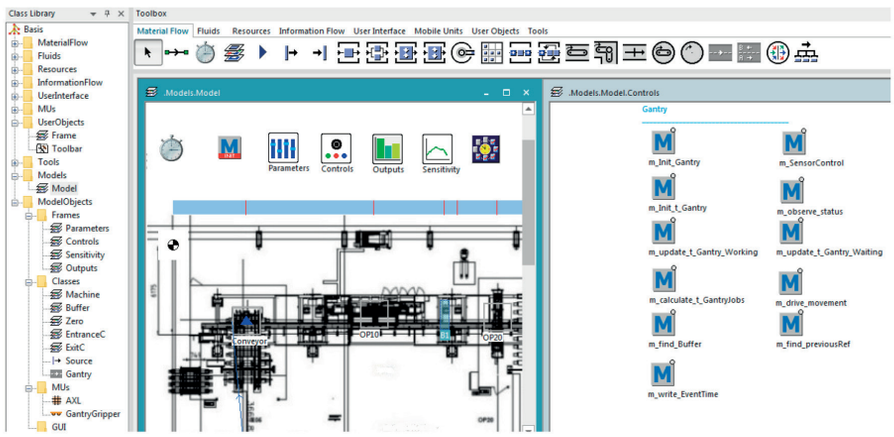


Fig. 4: Interfaz Tecnomatix Plant Simulation y elementos para el control del pórtico

herramienta Facts Analyzer. Los objetivos de optimización fueron: maximizar la producción, minimizar el esfuerzo en cambios y minimizar el número total de máquinas a modificar. Las variables de decisión para el modelo se muestran en la Tabla II. El método de optimización multiobjetivo se basa en el algoritmo NSGA-II, se realizaron 5000 evaluaciones de una simulación de 10 días, con tamaño de la población 50 y número de réplicas 3. Este modelo de optimización se realizó asociando un coste/esfuerzo genérico a cada cambio de parámetro, aunque podría también realizarse utilizando datos de coste/inversión para cada tipo de cambio en cada una de las máquinas a incluir en el análisis.

Se resumen los resultados de la optimización. El rango de soluciones iba desde 400 a 515 unidades producidas, con un máximo de 6 máquinas a modificar. Una vez visualizados todos los resultados posibles, se realizó el filtrado de los resultados del diagrama de Pareto. Mediante la opción de filtrado avanzado de soluciones, se estableció el valor del número de máquinas con modificaciones a 2 y para este este caso, la mejor de las soluciones proporcionaba una producción un 25,7% superior al caso base.

Además, durante el desarrollo de la automatización se definieron las variables a monitorizar y marcas en los sistemas de control de PLC y CNC de los equipos. Los datos monitorizados se han tratado en la plataforma de digitalización de manera que el cliente tiene la trazabilidad de producción, proceso y otras funcionalidades, lo que se denomina la sombra digital. El lazo de conexión entre los datos en la plataforma digital y el modelo se realizó mediante la API de la plataforma digital, donde se han recogido tiempos de proceso por pieza y agregado por tipo de producto para alimentar de forma automática al modelo. En concreto, el modelo puede recibir de manera automática la distribución de tiempos de proceso por eje, tiempos medios de cambio de referencia y estimación de disponibilidad técnica.

5. CONCLUSIONES

Este artículo propone una metodología de desarrollo del gemelo digital productivo, profundizando en la modelización detallada por eventos discretos. El gemelo digital productivo aúna las tecnologías de simulación DES y monitorización 4.0. y proporciona a los fabricantes de sistemas de producción una herramienta de diseño y validación de la solución, así como un producto servicio a incluir en su oferta a clientes. Para los clientes usuarios, el gemelo digital es una herramienta para planificar y mejorar la operativa de la instalación productiva en fase de uso, funcionalidades necesarias para gestionar los sistemas de producción en entornos de variabilidad. El artículo concluye con la exposición de un caso de uso del gemelo digital de una línea para la fabricación de ejes de ferrocarril.

Variable	Descripción del valor	Base	Min	Máx	Esfuerzo/coste cambio
Disponibilidad (AV)	Valor absoluto sobre 100	97	97	99	De 97 a 99 -> 100
Tiempo Proceso (PT)	Tanto por 1 sobre el valor actual del tiempo de proceso	1	1	0.8	De 1 a 0.8 -> 100
Tiempo Manipulación (HT)	Reducción sobre el valor actual (en segundos)	0	0	10	De 0 a 10 -> 50

Tabla II: Variables de decisión para la optimización

REFERENCIAS

[1] ElMaraghy W, ElMaraghy H, Tomiyama T, et al. "Complexity in engineering design and manufacturing". CIRP Ann., Vol. 61-2. p. 793-814. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001.
[2] Boyang S, Windo H, Ashutosh T, et al., "Integrating Optimisation with Simulation for Flexible Manufacturing System", Adv. Transdiscipl. Eng., pp. 175–180, 2016, DOI: https://doi.org/10.3233/978-1-61499-668-2-175.
[3] Lidberg S, Pehrsson S, Frantzén M. "Applying Aggregated Line Modeling Techniques to Optimize Real World Manufacturing Systems". Procedia Manuf., Vol. 25 p. 89-96, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.061
[4] Qi Q, Tao F, Zuo Y, et al., Digital Twin Service towards Smart Manufacturing, Procedia CIRP, Vol. 72, pp. 237-242, 2018, DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103.
[5] Negri E, Fumagalli L, y Macchi M, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems", Procedia Manuf., Vol. 11, p. 939-948, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198.
[6] Stark, R, Kind S, y Neumeyer S, "Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design", CIRP Ann., Vol. 66- 1. p. 169-172, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045.
[7] Chryssolouris G, Mavrikios D, Papakostas N et al. "Digital manufacturing: history, perspectives, and outlook", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Parte B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 223-5 p. 451-462. DOI: https://doi.org/10.1243/09544054JEM1241.
[8] Lee J, Kao HA, Yang S, "Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment", Procedia CIRP, Vol. 16, p. 3-8, 2014 DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001.
[9] Lee J, Bagheri B, y Kao HA, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems», Manuf. Lett., Vol. 3, p. 18-23, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
[10] Kritzinger W., Karner M, Traar G, Henjes J, y Sihn W, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", IFAC-Pap., Vol. 51-11, p. 1016-1022, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474
[11] Caggiano A y Teti R. "Modelling, Analysis and Improvement of Mass and Small Batch Production through Advanced Simulation Tools". Procedia CIRP. Vol. 12 p. 426-431. 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.073
[12] Goienetxea A, Ng AHC, Ruiz Zuniga E et al. "Improving the material flow of a manufacturing company via lean, simulation and optimization". 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 2017, p. 1245-1250
[13] Norouzilame F y Jackson M "On the Application of Discrete-Event Simulation in Production", en Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems, Azevedo A, Ed. Heidelberg: Springer International Publishing, 2013, p. 259-272. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-00557-7_21.
[14] Barlas P y Heavey C, "Automation of input data to discrete event simulation for manufacturing: A review", Int. J. Model. Simul. Sci. Comput., Vol. 07- 01, p. 1630001,2016. DOI: https://doi.org/10.1142/S1793962316300016.
[15] Bokrantz J, Skoogh J, Lämkull D, et al, "Data quality problems in discrete event simulation of manufacturing operations", SIMULATION, Vol. 94-11, p. 1009-1025, 2018, DOI: https://doi.org/10.1177/0037549717742954.
[16] Senington, R, Baumeister F, Ng A, et al., "A linked data approach for the connection of manufacturing processes with production simulation models", Procedia CIRP, Vol. 70, p. 440-445, 2018, DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.243.