

SIMULACIÓN POR EVENTOS DISCRETOS DE LA FABRICACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS PARA LA GENERACIÓN DE SU “MODELO DIGITAL”

**G. MalloI⁽¹⁾, J. Boix⁽¹⁾, J.I. Cantero⁽¹⁾, M. Vinaroz⁽¹⁾, A. Olmedilla⁽¹⁾, J. M. Tiscar⁽¹⁾
S. Herrando⁽²⁾, P. Alcoriza⁽²⁾**

⁽¹⁾ Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I. Castellón. España.

⁽²⁾ Nexus Integra

Palabras clave: Industria 4.0, control de procesos, digitalización, “gemelo digital”

Tipo de comunicación: oral

Resumen

La primera de las etapas en el proceso de transformación que debe experimentar una compañía industrial para desarrollar las capacidades propias de la Industria 4.0 implica la consecución del denominado “gemelo digital” de los diferentes procesos internos de la misma. En el ámbito productivo, las tecnologías disponibles ofrecen la posibilidad de registrar en tiempo real todos los eventos y estados del proceso productivo. Esto permite disponer de un modelo digital actualizado de la fábrica, el cual se conoce habitualmente como “gemelo digital”. En el presente trabajo se ha desarrollado e implementado una metodología para generar un modelo digital del proceso de fabricación de baldosas cerámicas. Para ello se han empleado diferentes tecnologías que han permitido crear un sistema ciber-físico del entorno de fabricación, basándose, por un lado, en la captura de datos de proceso, apoyada por un sistema de trazabilidad de producto y, por otro lado, en un proceso de modelado y simulación dinámica de sistemas mediante la técnica de los eventos discretos.

1 Introducción

En unos mercados cada vez más competitivos, la mejora de los mecanismos de toma de decisión asociada a la digitalización de los procesos de fabricación supone una gran oportunidad para optimizar la productividad y eficiencia de las empresas. Por esta razón, el potencial económico de la conocida como Industria 4.0 reside en su habilidad para acelerar la toma de decisiones y adaptar los procesos internos de las organizaciones a los cambios del entorno, gracias al análisis continuo de grandes volúmenes de datos y a la interconexión entre los sistemas ciber-físicos y las personas [1].

1.1 El “gemelo digital”

Hoy en día, el avanzado grado de instrumentación de los procesos industriales facilita la captura de datos a lo largo de todo el ciclo productivo y permite registrar en tiempo real todos los eventos y estados que se dan en un proceso. Esto ofrece la posibilidad de disponer de un modelo digital de la fábrica, actualizado en todo momento, el cual se conoce habitualmente como “gemelo digital” [2]. El interés de disponer de un “gemelo digital” del proceso de fabricación es, por un lado, el conocer en tiempo real lo que está sucediendo en el mismo y, por otro lado, el realizar una gestión de las decisiones en base al análisis de la información generada en el “gemelo digital”. Numerosos trabajos de investigación han puesto de manifiesto que el despliegue de esta herramienta es una etapa fundamental en el camino de transformación hacia la Industria 4.0 [3][4].

En este ámbito, el “gemelo digital” constituye una representación virtual y dinámica del sistema productivo. Esta representación, es capaz de mantenerse perfectamente sincronizada con el sistema físico gracias a la combinación de modelos matemáticos y una elaboración en tiempo real de los datos facilitados por la instrumentación de proceso. El conjunto formado por el “gemelo digital” y el entorno físico representado constituye lo que se conoce como un sistema Ciber-Físico [5] (ver figura 1).

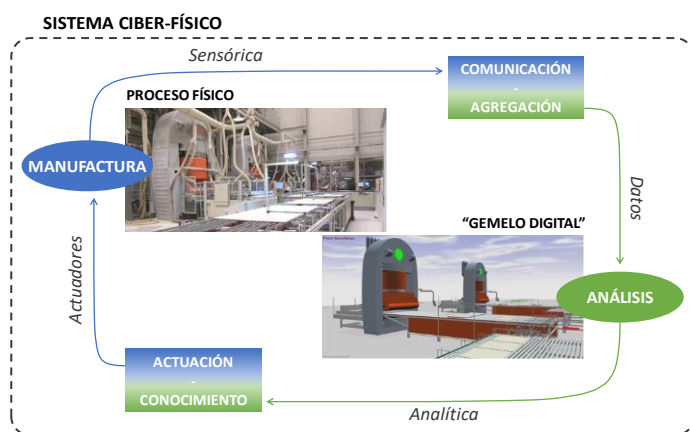


Figura 1. Sistema ciber-físico en un entorno productivo resultante de la integración entre el “gemelo digital” y el mundo físico.

Disponer del “gemelo digital” de un proceso de manufactura ofrece la posibilidad de simular y optimizar el sistema productivo, contribuyendo a una mejora significativa de la competitividad, la productividad y la eficiencia. Además de estos aspectos propios de la gestión productiva, si el “gemelo digital” incorpora modelos de comportamiento del producto a lo largo del proceso de fabricación, sus propiedades fisicoquímicas pueden ser evaluadas durante todo el proceso e interrelacionadas con las variables productivas.

Esta posibilidad contribuye no sólo a mejorar la eficiencia de la producción, sino también a incrementar la calidad de los productos fabricados y a mantenerla en niveles óptimos.

La consecución de un “gemelo digital” implica una serie de pasos previos, que van ligados al grado de integración que pueda establecerse entre el proceso físico y su copia virtual (ver figura 2). En primera instancia, es imprescindible disponer de un modelo digital, el cual es una representación digital del proceso físico, que no utiliza ningún tipo de intercambio automatizado de datos entre el mundo físico y el entorno digital. Estos modelos pueden estar constituidos por modelos de simulación, modelos matemáticos o cualquier otro tipo de modelo de objetos físicos que no emplee ningún tipo de integración automática de datos.



Figura 2. Posibles flujos de información entre el proceso físico y el proceso digital asociado dependiendo de el grado de integración alcanzado.

Una vez desplegado el modelo digital de un proceso, existe la posibilidad de generar su “sombra digital” gracias a la implementación de un flujo unidireccional y automatizado de datos entre el estado del proceso físico y el mundo digital. En esta situación, un cambio en el estado del proceso físico se traduce directamente en un cambio en el proceso digital, pero no al contrario.

Finalmente, si el flujo de datos entre el proceso físico y el digital está completamente integrado en ambas direcciones, puede hacerse referencia al “gemelo digital”. En esta situación el proceso digital ejerce acciones de control sobre el proceso físico, de tal

manera que un cambio en el proceso físico conduce directamente a un cambio en el estado del "gemelo digital" y viceversa.

Implementar un "gemelo digital" en una empresa cerámica es un gran reto debido, fundamentalmente, a que la información se encuentra generalmente descentralizada en diferentes islas de datos, no existiendo, en muchos casos, un único origen válido [6]. Sin embargo, desde el punto de vista del proceso de fabricación, en los últimos años se han producido avances significativos en la integración de los datos procedentes de los diferentes equipos productivos. De hecho, existen varias experiencias piloto, como la descrita en [7], que demuestran la posibilidad de integrar completamente en una planta cerámica los datos industriales referentes, tanto a las variables críticas de cada etapa del proceso, como a las variables de operación del equipamiento. Ante esta situación, en el presente trabajo se exploran las posibilidades de generar un modelo digital del proceso de fabricación de baldosas cerámicas haciendo uso de herramientas de simulación y visualización de código abierto, que sienten las bases para la consecución del "gemelo digital" en un futuro inmediato.

1.2 Simulación dinámica mediante eventos discretos

El procesado de las baldosas cerámicas, desde su conformado hasta su empaquetado, se enmarca perfectamente dentro de la tipología de proceso discreto. En contraposición con los procesos continuos, en los que el estado del sistema cambia continuamente en el tiempo, los procesos discretos están constituidos por una serie de secuencias o eventos, que tienen lugar en un momento determinado del tiempo. Los procesos continuos implican habitualmente operaciones de transformación en las que se manipulan fluidos como, por ejemplo, las plantas químicas como las refinerías de petróleo. Por su parte, ejemplos de procesos discretos serían la mayor parte de los procesos de manufactura, los sistemas de transporte, los sistemas públicos, como los hospitales o las administraciones públicas, y todos aquellos procesos y sistemas que impliquen la gestión de colas.

Para la generación del modelo digital planteado en este trabajo, se ha empleado una técnica de simulación denominada Simulación por Eventos Discretos (DES, acrónimo del inglés Discrete-Event Simulation). Esta metodología permite modelar un determinado sistema como una secuencia (discreta) de eventos en el tiempo. Durante la simulación, cada evento marca un cambio en el estado del sistema considerándose que, entre dos eventos consecutivos, no se produce ningún cambio en el mismo [8]. De manera general, la DES se emplea para modelizar sistemas que impliquen la gestión de colas. El sistema se representa como entidades que fluyen entre las diferentes actividades que constituyen el proceso, y en las cuales pueden aparecer colas. Las colas se llenan de entidades cuando estas llegan a una determinada actividad con una velocidad mayor que la velocidad a la que pueden ser procesadas por la actividad.

En un modelo DES del proceso cerámico, las piezas cerámicas serían entidades físicas que fluirían a través de los sistemas de transporte, apiladores, sistemas de almacenamiento y equipos de procesado que constituyen las diferentes líneas de la planta cerámica. Las colas, por poner un ejemplo, serían el propio parque de vagonetas guiadas que puede existir entre las secciones de esmaltado y cocción, los pulmones de almacenamiento vertical, que suelen encontrarse en diferentes partes de las líneas de fabricación, comúnmente denominados "compensers" o los formadores de filas de piezas existentes generalmente en las entradas de los secaderos y hornos.

La implementación de un modelo DES puede realizarse empleando librerías específicas desarrolladas para lenguajes de programación de alto nivel como C++ o Python®. Sin embargo, en este trabajo, se ha preferido utilizar una herramienta de código abierto denominada JaamSim® [9], cuyo uso no requiere de conocimientos avanzados de programación y permite obtener, con tiempos de desarrollo relativamente cortos,

soluciones de gran utilidad. JaamSim® (Java Animation Modelling and Simulation) es un software de simulación por eventos discretos cuyo desarrollo se inició en 2002. El paquete incluye un interfaz de usuario gráfico, un motor de animaciones 3D y un conjunto completo de objetos y utilidades para la construcción de modelos de simulación. Se trata de una solución orientada a objetos, extremadamente rápida y escalable hasta aplicaciones de tamaño considerable (modelos con más de 300.000 entidades han sido probados con velocidades de procesamiento aceptables). Junto con el hecho de presentar un corto periodo de aprendizaje, la otra razón por la que se ha seleccionado JaamSim® para llevar a cabo este trabajo es que, al tratarse de un paquete de código abierto, el código de programación se distribuye libremente. Esto permitirá en un futuro modificar o crear objetos y métodos de modelización que permitan, en caso de necesidad, adaptar los desarrollos realizados a las especificidades del proceso de fabricación de baldosas.

2 Implementación del modelo digital

2.1 Características generales

El modelo digital desarrollado mediante DES está constituido por dos líneas de conformado y decoración, ambas con las mismas capacidades productivas. Cada una de las líneas consta de una prensa hidráulica con una capacidad máxima de prensado de 64000 kN, un secadero horizontal de 20 m de longitud, 5 planos de secado y 3,7 m de ancho útil, y una línea de esmaltado con varias aplicaciones decorativas. El proceso se completa con un parque de almacenamiento de material crudo y cocido y un horno monoestrato de rodillos de 130 m de longitud y 2,7 m de ancho útil (ver figura 3). Por simplicidad, en este primer desarrollo, se ha preferido no incluir la sección de clasificación y embalado del producto final, si bien hay que indicar que la herramienta JaamSim® permitiría su implementación en el modelo.

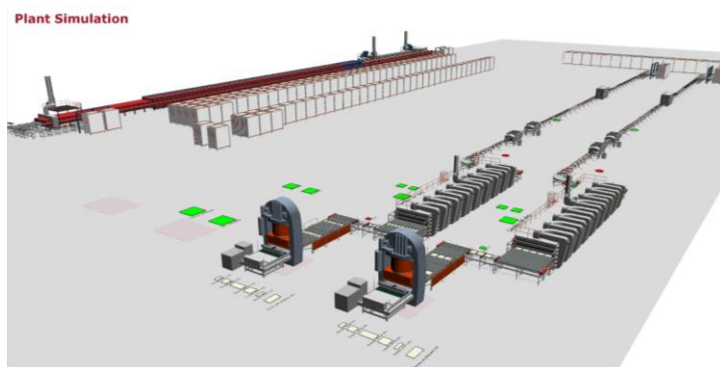


Figura 3. Vistas 3D del modelo digital desarrollado.

El modelo se ha planteado para simular la fabricación de lotes de baldosas cerámicas de gres porcelánico de hasta 5 tamaños nominales en cocido posibles: 30 cm x 60 cm, 60 cm x 60 cm, 60 cm x 120 cm, 25 cm x 75 cm y 75 cm x 75 cm. Para ello se ha definido un régimen productivo de 3 turnos/día, 5 días a la semana, en las secciones de conformado y esmaltado y de 3 turnos/día, 7 días a la semana, en el horno, lo cual permitiría alcanzar, aproximadamente, una capacidad teórica de 8.000 m²/día.

Junto con todo el equipamiento empleado en la ejecución de las etapas de proceso consideradas, el modelo incluye todos los sistemas de transporte necesarios para realizar la manipulación del producto entre ellas. De este modo, permite simular el transporte de las piezas en las rodilleras de salida de las prensas, los formadores de filas de entrada de secaderos y hornos, las cintas de correas de las líneas de esmaltado o el almacenamiento y transporte en vagones, entre otros. A modo de ejemplo, en las imágenes de la figura 4, se muestra, por un lado, la visualización en 2D de la parte del modelo digital correspondiente a la sección de prensado y el inicio de las líneas de decoración y, por otro lado, la vista esquemática de la misma región del modelo, en la que quedan reflejados los diferentes diagramas de bloques y módulos en el entorno de programación JaamSim®.

Para parametrizar el modelo, se han definido una serie de ficheros de encabezamiento para cada uno de los tamaños de pieza a fabricar. Dichos ficheros incluyen, por ejemplo, las velocidades teóricas de los diferentes elementos de transporte, el número de piezas por fila procesadas en la prensa, el secadero o el horno, el número de piezas por fila y plano contenidas en las vagonetas de almacenamiento o la duración de los ciclos de secado y cocción. Además, para que el modelo digital permita simular unas condiciones reales de operación, se ha generado un fichero de inicialización en el que queda recogida la planificación que se espera ejecutar en las diferentes líneas de conformado. De este modo, para cada prensa se recogen secuencialmente las órdenes de fabricación planificadas, con el tamaño y cantidad de metros cuadrados a fabricar en cada caso.

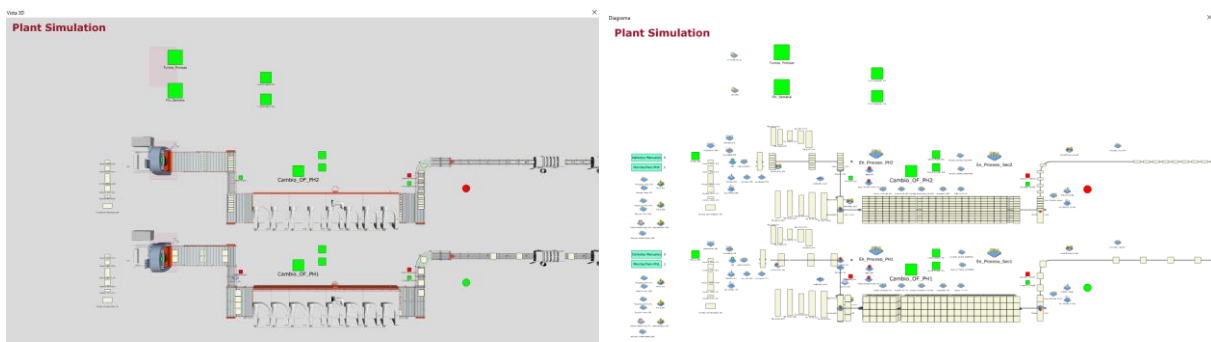


Figura 4. Vistas de la sección de conformado implementada en el modelo digital desarrollado. Visualización renderizada (izquierda) y vista en esquema de desarrollo (derecha).

2.2 Incorporación de variabilidad en la simulación

El modelo ha sido dotado de la variabilidad asociada a los procesos industriales para tener en consideración interrupciones y pérdidas de rendimiento productivo debidos a averías del equipamiento, acciones de mantenimiento preventivo, bajas productivas, interrupciones por incidencias en las líneas de transporte, paros para realizar cambios de modelo y paros relacionados con los cambios de tamaño del producto fabricado. Esto permite simular la evolución de métricas productivas típicas como son la disponibilidad, el rendimiento y la calidad, las cuales contribuyen al OEE (Overall Equipment Efficiency) de las líneas productivas [10]. Dicha variabilidad se ha implementado mediante las funciones probabilísticas proporcionadas por JaamSim®, las cuales han sido programadas utilizando algoritmos adaptados a partir de [11]. Estas funciones permiten generar de manera aleatoria datos que se ajustan a una determinada distribución probabilística, con el fin de simular el efecto de todas las variables indicadas. La selección de la función de probabilidad utilizada en cada caso se ha realizado en base al análisis de los datos generados por el sistema de trazabilidad puesto a punto durante el desarrollo del proyecto descrito en [7]. A continuación, se describe la variabilidad incluida en el modelo, quedando resumidas las funciones probabilísticas empleadas en la tabla 1:

- Modelización de la variabilidad asociada a los paros de proceso

La variabilidad asociada a los paros, ya sean de forma planificada, o imprevista, afectan directamente a la disponibilidad del equipamiento. Los paros han sido modelizados considerando la frecuencia entre paros y la duración de estos.

- Modelización de la variabilidad de la cadencia productiva

Aunque en condiciones reales de fabricación los equipos productivos suelen trabajar con velocidades de operación constantes, a la hora de modelizar el proceso es interesante incorporar una cierta variabilidad a esta velocidad para absorber ciertos

paros de proceso que, por su corta duración, son difíciles de modelizar del modo anteriormente descrito. Procediendo de este modo, puede modelizarse la incidencia de los conocidos como "microparos" en el rendimiento de los elementos productivos.

- Modelización de las bajas productivas

Las bajas productivas afectan directamente a la calidad de la producción. Para reflejar su incidencia en diferentes puntos de las líneas de fabricación, la generación de mermas ha sido implementada mediante un generador booleano que modifica una propiedad asignada a cada una de las piezas procesadas, la cual indica si esta es defectuosa o no. La probabilidad de que una pieza sea considerada defectuosa viene fijada por una función matemática.

Tabla 1. Resumen de las funciones probabilísticas empleadas en la modelización de la variabilidad del modelo.

Tipo de variabilidad	Variables modelizadas	Funciones de probabilidad	Ejemplos
Variabilidad en los paros de líneas	- Paros en líneas de fabricación - Averías	Frecuencia de paro: distribución de Erlang Duración de paro: distribución log-Normal	Parada no planificada en prensas: Frecuencia: Distr. de Erlang Factor forma = 1 Media = 1 h
	- Mantenimiento programado	Frecuencia de paro: serie temporal definida Duración del paro: distribución log-Normal	Duración: Distr. Log-Normal MediaNormal = 0 DesviaciónSTDNormal = 1 Escala = 10 min
Variabilidad en cadencia productiva	Cambios en cadencia productiva de: - Prensas - Horno	Distribución discreta	Cadencia de prensado: Porcentajes de cadencia máxima, asociados a una probabilidad Porc.(%): 100 95 90 85 Prob.(%): 25 50 20 5
Variabilidad en la merma generada	Merma en: - Prensas - Decoración - Parque - Horno	Función continua senoidal acoplada con un generador booleano o distribución discreta	Defectos generados en prensa: $y(t) = 2000 \sin(2 \pi t/T)$ T = 45 min

3 Aplicación del modelo digital

Tabla 2. Planificación de lotes y resultados de las simulaciones para una línea de conformado (*lote no terminado).

Lote	Cantidad planificada (m ²)	Tiempo en fabricación (h)		
		Condición A OEE = 61,8%	Condición B OEE = 65,2%	Condición C OEE = 66,7%
1	5.500	14,4	14,3	13,8
2	3.500	11,3	9,8	9,5
3	4.000	13,4	11,7	11,5
4	3.500	12,5	11,9	11,3
5	5.500	21,6	19,9	19,9
6	4.500	18,9	15,1	14,1
7	4.500	18,5	18,1	14,4
8	2.000	-	10,4	8,5
9	2.500	-	-	9,0 (87% del total)*
Total (m ²)		30.998	32.997	35.199
Merma (m ²)		1.017	1.183	302
Paros (h)		38,4	34,6	34,8

Para evidenciar la aplicabilidad del modelo desarrollado, se han planteado varios casos de estudio que ilustran como este reproduce correctamente el comportamiento del proceso de fabricación. En primer lugar, se ha llevado a cabo la simulación de la producción en una de las líneas de conformado del modelo, a lo largo de una semana completa, en diferentes condiciones de variabilidad del proceso. Durante el periodo de tiempo estudiado, se ha evaluado la incidencia de las mermas y los paros de la línea, registrando las métricas productivas de calidad y disponibilidad [11].

Para ello se ha definido una planificación (ver tabla 2) de varios lotes de piezas de tamaño nominal cocido 60 cm x 60 cm, con diferentes cantidades objetivo de producto a

conformar, y se ha observado la evolución de la producción simulada. Hay que destacar que, por simplicidad, en la aplicación del modelo no se han considerado posibles cambios en el rendimiento del equipamiento, si bien el modelo está preparado para simularlos.

En concreto, como puede observarse en la tabla 2 y la figura 5, se han evaluado tres condiciones de variabilidad diferentes, correspondientes a un OEE medio de la sección de conformado de 61,8%, 65,2% y 66,7%, respectivamente. En la primera condición (condición A), el bajo valor del OEE se ha conseguido aumentando la frecuencia y la duración de los paros descritos en la tabla 1, lo cual ha redundado en una baja disponibilidad del equipamiento durante el periodo simulado (65,3%). En la segunda condición (condición B), la disponibilidad ha sido sensiblemente superior (68,9%) y la calidad se ha mantenido en niveles muy similares a los del caso anterior (97%). Finalmente, la última condición simulada ha establecido el mejor OEE, como consecuencia de presentar una disponibilidad similar a la del caso anterior, pero una calidad muy alta (99,3%), obtenida reduciendo el número de piezas defectuosas generadas en la prensa.

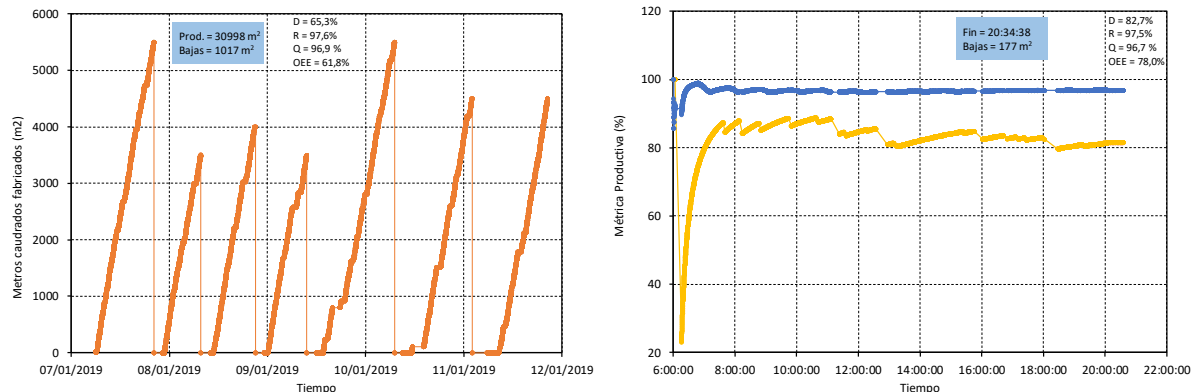
En los gráficos situados en el lado izquierdo de la figura 5 se representa, para la semana simulada, la evolución con el tiempo de la producción de la sección de conformado, en las tres condiciones planteadas. A medida que transcurren las simulaciones, para un determinado lote, la cantidad de metros cuadrados producidos aumenta progresivamente hasta alcanzar la cantidad total planificada. En ese momento, se inicia un nuevo lote de fabricación, lo cual queda ilustrado en los gráficos por los "dientes de sierra" presentes en las gráficas. Los intervalos de tiempo en los que los metros cuadrados producidos permanecen en valores nulos corresponden a periodos de tiempo dedicados al cambio de lote de fabricación y a la realización de los ajustes correspondientes. En las gráficas, para cada condición se indica la cantidad total de metros cuadrados fabricados durante la semana, el número de bajas generadas (m^2) y las métricas productivas promedio. Como cabría esperar, la condición que permite producir una mayor cantidad de metros cuadrados a lo largo de la semana simulada es la condición de mayor OEE (condición C), con 35.199 m^2 . Según el modelo, en estas condiciones, la línea podría fabricar 8 de los lotes planificados e iniciar buena parte de un noveno. La peor condición (condición A), debido a una mayor incidencia de paros imprevistos y de tiempos dedicados a los cambios de lote, sólo permitiría fabricar 30.998 m^2 , correspondientes a 7 de los lotes planificados. La condición B, con un OEE intermedio, permitiría fabricar 8 lotes completos, equivalentes a 32.997 m^2 .

Por su parte, en los gráficos situados en el lado derecho de la figura 5, se representa la evolución en el tiempo de las métricas de calidad y disponibilidad correspondientes al primer lote simulado en cada una de las condiciones. Para poder representar los datos con mayor claridad, no se ha considerado el periodo de tiempo destinado a la realización de los ajustes y preparaciones previas a la ejecución del lote. Por este motivo, los valores de disponibilidad del lote son sensiblemente superiores a la media semanal, resultante de englobar los datos de varios lotes. Junto al promedio de las métricas productivas del lote, se indica el tiempo de finalización de este y las bajas de fabricación generadas (m^2). La simulación realizada en las mejores condiciones de OEE es la que permite fabricar la cantidad de producto planificada (5.500 m^2) en el menor tiempo posible, concretamente en 13,8 h, gracias a la baja cantidad de bajas generadas. Por su parte, la simulación llevada a cabo en las condiciones de menor OEE (condición A) es la que predice un mayor tiempo de ejecución (14,4 h), debido a la baja disponibilidad del equipamiento.

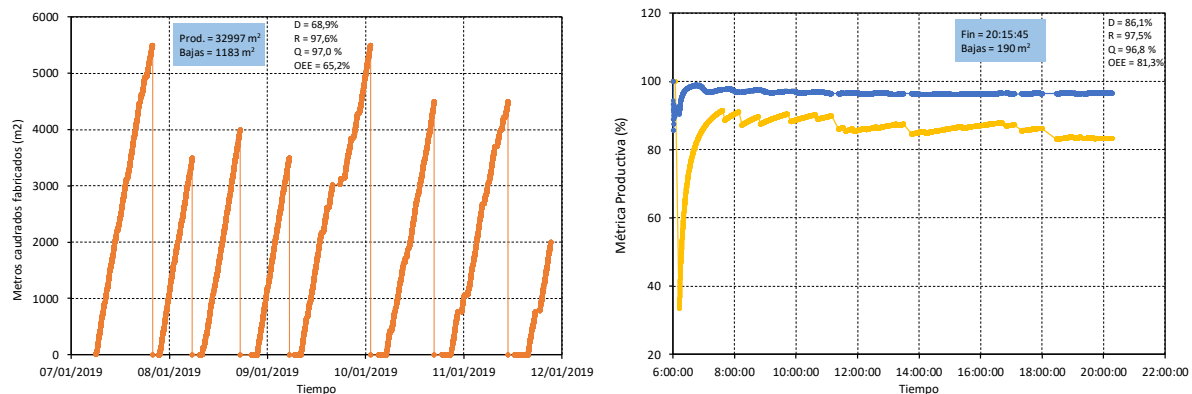
En estos mismos gráficos es interesante destacar como el modelo permite seguir la evolución de las métricas productivas en las diferentes condiciones simuladas. Así, por ejemplo, la incidencia de una mayor frecuencia y duración de los paros en la condición A, queda reflejada en una mayor reducción puntual de la disponibilidad (trazo amarillo) experimentada en el primer paro significativo registrado aproximadamente a las 06:15 h,

con respecto al gráfico de las otras dos condiciones. Del mismo modo, la mayor generación de bajas en las condiciones A y B, con respecto a la C, se evidencia por una estabilización en valores inferiores de la calidad de la producción (trazo azul) al finalizar el lote estudiado.

CONDICIÓN A



CONDICIÓN B



CONDICIÓN C

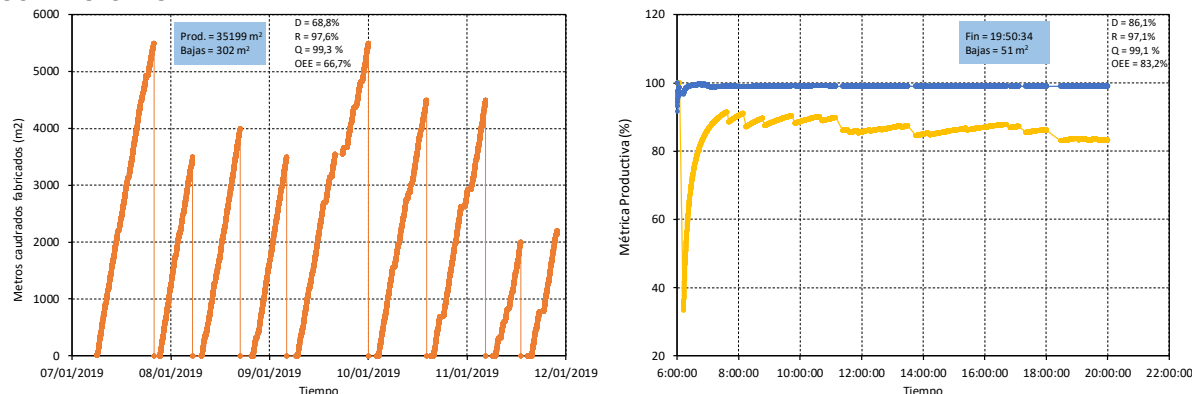


Figura 5. Simulación de la productividad de una línea de conformado. D: Disponibilidad; R: Rendimiento; Q: calidad. Izquierda: evolución de la cantidad de producto conformado, por lotes de fabricación; derecha: evolución de la disponibilidad (amarillo) y de la calidad (azul) para un lote de fabricación.

El ejemplo que se acaba de exponer ilustra de manera sencilla la potencialidad del modelo para realizar simulaciones del proceso de fabricación de baldosas. Sin embargo, el verdadero interés de una herramienta como la planteada reside en la simulación de situaciones productivas de mayor complejidad, en las que se combinan múltiples elementos productivos y lotes de fabricación con diferentes tamaños de pieza. Por ello, empleando el modelo completo, se han realizado simulaciones en tres condiciones de operación de la planta diferentes. En ambos casos se ha inicializado el cálculo con la misma planificación en las líneas de conformado, constituida por 30 lotes de piezas de

tamaño nominal cocido 75 cm x 75 cm y 60 cm x 60 cm, en la línea de conformado 1, y otros 30 lotes de piezas con tamaño 30 cm x 60 cm y 25 cm x 75 cm, en la línea 2. En ambas líneas se ha supuesto que se realizan dos cambios del tamaño de las piezas fabricadas (cambios de "formato"), iniciándose la producción en la prensa 1, con piezas de 60 cm x 60 cm, y en la prensa 2, con piezas de 25 cm x 75 cm.

En este caso, se ha mantenido, para las tres condiciones simuladas, el mismo rendimiento y la misma cantidad de merma, contemplándose, únicamente, modificaciones en la disponibilidad del equipamiento. Además, para que fuese más sencillo interpretar los resultados, en el cálculo de la disponibilidad del horno se ha adoptado como simplificación el hecho de que esta no se vea afectada por los cambios de lote y/o tamaño de las piezas fabricadas.

Como puede observarse en la tabla 3 la situación más desfavorable corresponde a la condición D, en la que la planta se ha dotado de un horno de 130 m de longitud. Pese a que el horno trabaja prácticamente a su máxima disponibilidad (99,7%), lo cual indica que siempre existe material crudo en el pulmón para ser alimentado, la corta longitud del horno penaliza mucho la productividad de la planta. En efecto, para producir un total de 213.180 m², con una media de 7.860 m²/día, la planta necesita 27,1 días. Además, la baja disponibilidad de las líneas de conformado (51,2% y 45,1%) está relacionada con el hecho de que, a finales de semana (jueves y/o viernes), no existen en el pulmón vagonetas libres para almacenar más material crudo.

En la condición E, la productividad de la planta mejora sensiblemente, alcanzándose una producción de 8.480 m²/día, lo cual se consigue gracias al uso de un horno de mayor longitud (170 m). En esta situación, las dos prensas, aunque tienen una disponibilidad ligeramente superior a la del caso anterior, no pueden fabricar suficiente producto para que el horno se vea alimentado todos los fines de semana, de ahí el descenso observado en su disponibilidad (87,1%).

Tabla 3. Resultados de las simulaciones para el modelo completo en tres condiciones de operación diferentes.

	Cond. D	Cond. E	Cond. F
Longitud horno (mm)	130	170	170
Tiempo fabricación (días)	27,1	25,0	22,2
Producción total (m ²)	213.180	214.050	213.090
Productividad (m ² /día)	7.860	8.560	9.600
Disponibilidad horno (%)	99,7	87,1	99,6
Disp. línea 1 (%)	51,2	55,0	62,9
Disp. línea 2 (%)	45,1	49,2	55,2

Finalmente, en la simulación correspondiente a la condición F, se obtienen los mejores resultados, requiriéndose únicamente 22,2 días para fabricar todos los lotes planificados, con una productividad media de 9.600 m²/día. En este caso, el horno es también de 170 m, pero se ha modificado la incidencia estadística de los paros en las líneas de conformado y decoración para incrementar su disponibilidad, lo cual maximiza la disponibilidad del horno (99,6%) al ser alimentado en continuo todos los fines de semana.

Este segundo caso de estudio muestra la utilidad del modelo digital desarrollado para realizar predicciones que ayuden a mejorar la toma de decisiones en planta. El modelo puede ser acoplado a un algoritmo de optimización para simular múltiples posibles escenarios en base a la modificación de los parámetros de entrada, con tal de proporcionar los resultados que mejor se adapten a las necesidades concretas del momento. La técnica resulta muy eficiente, permitiendo simular situaciones complejas, como las que se acaban de describir, en cuestión de minutos. Así, por ejemplo, cada una de las simulaciones del segundo caso de estudio se han completado en una media de 4 minutos, empleando un ordenador convencional con un procesador Intel Core i5 y una memoria RAM de 8 GHz.

4 Conclusiones y trabajo futuro

Las conclusiones que se derivan del presente trabajo se recogen a continuación:

- El “gemelo digital” se considera como una herramienta clave para la implementación de los estándares propios de la Industria 4.0 en cualquier proceso de fabricación.
- Se ha desarrollado un modelo digital del proceso de fabricación de baldosas cerámicas basado en el uso de la técnica de modelado dinámico de sistemas por eventos discretos, haciendo uso de la herramienta de software libre JaamSim®.
- Se ha aplicado con éxito el modelo desarrollado para estudiar la productividad de las líneas de conformado y la gestión de una planta completa en diferentes condiciones de operación.
- La técnica de simulación por eventos discretos ha demostrado ser de gran eficacia para simular situaciones complejas en el entorno de fabricación de productos cerámicos.

Una vez validada la aplicabilidad de la técnica DES para modelizar el comportamiento del proceso de fabricación de baldosas cerámicas, se plantean varias posibilidades de trabajo futuro. En primer lugar, integrar de manera automática el modelo digital desarrollado con un proceso de fabricación real, vía un protocolo de comunicaciones estándar, como puede ser OPC-UA, para disponer de su “sombra digital”. Y, en segundo lugar, partiendo de dicha “sombra digital”, establecer los procedimientos que permitan interactuar directamente con el proceso físico, para establecer su “gemelo digital”.

5 Bibliografía

- [1] L. Monostori et al. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*; Volume 65, Issue 2 (2016), 621-641
- [2] T. Uhleman et al. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*; Volume 61 (2017), 335-340
- [3] E. Negri et al. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*; Volume 11 (2017), 939-948
- [4] W. Krintzinger et al. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC PapersOnLine*; 51-11 (2018), 1016-1022
- [5] Y. Lu et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*; Volume 61 (2020), 101837
- [6] G. Mallol. Control y automatización en la industria cerámica. Evolución y perspectivas. *Cerámica Información*; 347, (2007) 63-80
- [7] J. L. Hervas et al. A place-based policy for promoting Industry 4.0: the case of the Castellon ceramic tile district. *European Planning Studies* (2019)
- [8] S. Robinson. Simulation – The Practice of Model Development and Use. 2nd edition; Palgrave McMillan (2017)
- [9] JaamSim Development Team. JaamSim: Discrete-Event Simulation Software. Version 2016-14. URL <http://jaamsim.com> doi:10.5281/zenodo.57118
- [10] Richard Hedman et al. Analysis of critical factors for automatic measurement of OEE. *Procedia CIRP*; 57 (2016), 128-133
- [11] A. M. Law. Simulation modelling and analysis; New York: McGraw-hill, Inc (2007)

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren agradecer al Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) el apoyo económico brindado, a través de fondos FEDER, para poder llevar a cabo esta investigación mediante el programa de ayudas a Centros Tecnológicos de la Comunidad Valenciana para el desarrollo de proyectos de I+D y el programa INNOVA i4.0-CV.