

Jornadas de Automática

Gemelo digital para operar planta de producción de tableros MDF

De Prada, Cesar^{a,b*}, Oliveira-Silva, Erika^{a,b}, Palacín, Carlos^c, Vicente, Alberto^c, García, Ángel^c, Tadeo, Fernando^{a,b}

^aDpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad de Valladolid, C/ Dr Mergelina, s/n, 47011, Valladolid, España.

^bInstituto de Procesos Sostenibles, C/ Dr Mergelina, s/n, 47011, Valladolid.

^cSonae Arauco España, Soluciones de Madera, S.L. C/ Títulos 29, 47009, Valladolid, España.

To cite this article: De Prada, Cesar, Oliveira-Silva, Erika, Palacín, Carlos, Vicente, Alberto, García, Ángel, Tadeo, Fernando. 2025. Digital twin for operation of an MDF board production plant. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12176>

Resumen

Un gemelo digital para la operación de procesos se define como una representación virtual de un sistema físico, proceso o instalación que, trabajando en paralelo al proceso y actualizada en tiempo real, posee una arquitectura y funcionalidades que la convierten en una herramienta útil para mejorar muchos aspectos de la operación de procesos, desde decisiones básicas hasta su optimización. El gemelo digital emplea datos históricos y en tiempo real, junto con modelado, simulación y análisis avanzados, para replicar el comportamiento y el rendimiento de su homólogo físico. Este trabajo propone el desarrollo de un gemelo digital del funcionamiento de una planta de tableros MDF (*medium-density fiberboard*), abordando los retos planteados por la limitada disponibilidad de mediciones. Este trabajo presenta el desarrollo de modelos e interfaz esenciales para el uso de un gemelo digital. Los resultados subrayan el potencial del gemelo digital para mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y la toma de decisiones en la industria de procesos.

Palabras clave: gemelo digital, modelado y simulación, monitoreo en tiempo real.

Digital twin for operating an MDF board production plant.

Abstract

A digital twin for process operation is defined as a virtual representation of a physical system, process or facility that, working in parallel to the process and updated in real time, has an architecture and functionalities that make it a useful tool for improving many aspects of process operation, from basic decisions to optimization. The digital twin uses historical and real-time data, along with advanced modeling, simulation and analysis, to replicate the behavior and performance of its physical counterpart. This paper proposes the development of a digital twin of an MDF (*medium-density fiberboard*) plant operation, addressing the challenges posed by the limited availability of measurements. This paper presents the development of models and interface essential for the use of a digital twin. The results highlight the potential of the digital twin to improve operational efficiency, safety and decision making in the process industry.

Keywords: Digital twins, modelling and simulation, real-time monitoring.

1. Introducción

El Gemelo Digital (Digital Twin, DT) se ha convertido en un producto destacado en diversas empresas tecnológicas y centros de investigación relacionados con el sector industrial. Aunque a veces pueda usarse simplemente como un término

sofisticado para ofertas comerciales convencionales como simuladores o controles predictivos, el Gemelo Digital, o Digital Twin (DT), incluye conceptos nuevos que van más allá y se desarrollan en el contexto de la digitalización empresarial y la Industria 4.0. Un elemento diferenciador es el requisito de operar con modelos e información actualizada en tiempo real

y su operación en tiempo real. Representa una versión virtual de la realidad con aplicaciones más amplias que pueden incluir procesos, equipos, cadenas de suministro, personal, materiales, costes y mucho más. Igualmente, pueden incluir modelos diversos y complejos basados en datos o conocimientos, capacidad de respuesta en tiempo real y herramientas de apoyo a la toma de decisiones. El gemelo digital sirve como repositorio de información y modelos actualizados, proporcionando perspectivas, predicciones y capacidades de optimización y la capacidad de gestionar e integrar todos estos componentes (de Prada et al., 2022).

Los tableros de fibra de densidad media (MDF) son un material muy apreciado en la industria de los tableros derivados de la madera por su versatilidad y propiedades únicas (De Sousa Selvatti et al., 2018). El proceso de fabricación conlleva una serie de complejos procedimientos en varias etapas que implican fibras de madera, adhesivos, energía térmica y presión mecánica (Wilson, 2010). Este proceso polifacético presenta numerosos retos, que repercuten tanto en la calidad del producto final como en la eficacia operativa del proceso de fabricación. Un elemento de particular importancia en la línea de fabricación es la prensa continua, donde se define la capacidad máxima de la línea de MDF y se lleva a cabo la operación más costosa.

Este artículo presenta el desarrollo de un modelo y una interfaz para construir un gemelo digital para una industria de fabricación de tableros MDF, haciendo hincapié en las complejidades inherentes al proceso de desarrollo. La atención se centra en esbozar estrategias para hacer frente a estos retos y proporcionar ideas para superar los obstáculos encontrados durante la implementación. Una contribución significativa de este documento es su aplicación en una planta real de MDF, donde el gemelo digital se está utilizando para ayudar a los ingenieros de procesos a tomar decisiones. Esta aplicación en el mundo real autentifica e ilustra la eficacia del enfoque propuesto en un contexto industrial.

2. Gemelos digitales en la industria de proceso

El concepto de Gemelo Digital (DT) surge del modelado y simulación de procesos, con antecedentes históricos como los simuladores utilizados en la misión Apolo 13 (Shafto et al 2010; Grieves, 2019). Con la evolución tecnológica y la digitalización impulsada por la Industria 4.0, los DT han superado sus limitaciones iniciales y ahora integran modelos actualizables en tiempo real, bases de datos dinámicas, herramientas de simulación y toma de decisiones, y sistemas de adquisición de datos. Su estructura se basa en la combinación de modelos, datos físicos y químicos, parámetros operativos, y una base de datos que permite consultas avanzadas, todo ello con una interfaz de usuario cada vez más relevante en entornos industriales.

El DT actúa como repositorio centralizado y actualizado de datos y modelos que permiten analizar escenarios hipotéticos, optimizar operaciones, reducir riesgos y costos, y mejorar la planificación desde la etapa de diseño de una planta. Su implementación facilita la identificación de problemas, el seguimiento de recursos, el mantenimiento predictivo, y la evaluación de alternativas operativas. Gracias a su capacidad de simular comportamientos complejos y

evaluar decisiones en tiempo real, el DT se convierte en una herramienta estratégica para la eficiencia y sostenibilidad de los procesos industriales.

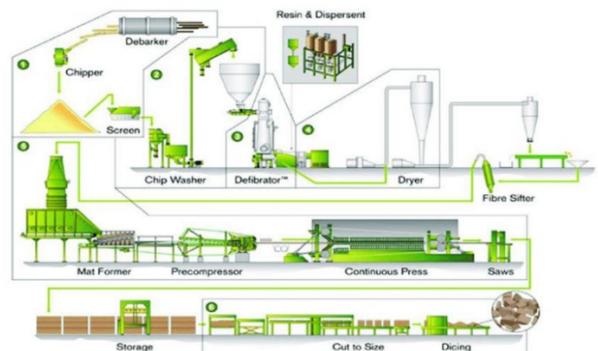


Figura 1: Diagrama de flujo de la producción de tablero MDF.

3. Caso de estudio

El concepto de Gemelo Digital, como ya se ha explicado, se desarrollará específicamente para una planta de producción de MDF. Este proceso puede beneficiarse significativamente de la implantación de un gemelo digital, principalmente debido a la poca información en línea en tiempo real.

3.1. Descripción del proceso

La fábrica de SONAE Arauco, en Valladolid, es capaz de producir 30 tipos distintos de tableros de fibra de densidad media (MDF), con grosor que van de 1,9 mm a 12 mm. Las etapas de producción para fabricar tableros MDF incluyen la preparación de la materia prima, el secado de la fibra, la aplicación de resina, la formación de la manta, el prensado y el postprocesado. Estas etapas se ilustran en la figura 1 y se resumen a continuación.

- Preparación de la materia prima: El proceso de producción comienza con la preparación de las fibras de madera obtenidas de diversas especies de frondosas y coníferas. Estas fibras se procesan cuidadosamente para garantizar unas dimensiones y una calidad uniformes.
- Aplicación de resinas: Las resinas sintéticas, como la urea-formaldehído o la melamina-formaldehído, se aplican a las fibras de madera. Estas resinas actúan como agentes aglutinantes durante la fase de prensado, mejorando la cohesión de las fibras.
- Secado de las fibras: Las fibras de madera preparadas se someten a un proceso de secado para reducir el contenido de humedad, lo que contribuye a la resistencia y estabilidad generales del producto MDF final.
- Formación de la manta: Las fibras revestidas se forman en una estera utilizando máquinas formadoras especializadas. El grosor de la estera se controla en función de las especificaciones deseadas para el producto final.
- Prensado: La manta formada se somete a calor y presión elevados en una prensa continua. Esta etapa crítica consolida las fibras, activa las reacciones químicas de polimerización de las resinas y da forma al tablero MDF.

- final. El prensado influye significativamente en las propiedades físicas del tablero.
- Corte y Enfriamiento: Tras el prensado, la cinta continua de tableros MDF prensados en caliente se corta y los tableros se enfrian para fijar la resina y mejorar la estabilidad dimensional. A continuación, los tableros se preparan para satisfacer las necesidades del mercado.

3.2. Modelo matemático

La capacidad máxima de la línea de MDF viene determinada por la etapa de prensado, que es también la más compleja de operar. Por lo tanto, es crucial modelar esta etapa con precisión. La etapa de prensado utiliza una prensa continua (como se muestra en la figura 2) que somete la manta, un compuesto de fibras de madera y aditivos químicos añadidos, a calor y presión, compactándola en un tablero a medida que avanza a lo largo de la misma. Para ello se ajusta su velocidad de acuerdo al tamaño de tablero deseado.



Figura 2: Prensa continua (Siempelkamp, s.f.).

Durante el proceso de prensado se producen varios mecanismos dentro del tablero. El prensado aumenta la densidad, lo que influye considerablemente en muchas propiedades físicas. El calentamiento acelera las reacciones químicas y la evaporación del agua. La presión hace que el vapor y el aire salgan por los lados del tablero. La consistencia del tablero se consigue mediante el curado de la resina resultado de las reacciones químicas. Todos estos factores deben tenerse en cuenta en el modelo, ya que influyen directamente en las propiedades del producto final.

Dado que las propiedades del tablero, densidad, temperatura, humedad, concentraciones de productos, etc. varían en tres dimensiones, para el modelado se considera un elemento de tablero con dimensiones dx, dy, dz que se mueve en la dirección x de avance de la prensa. Por las propiedades de simetría, sólo se considera la parte superior derecha de dicho volumen, como se ilustra en la figura 3.

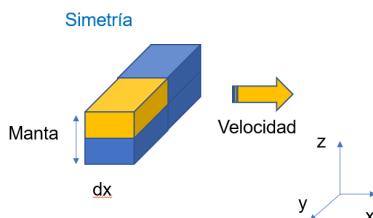


Figura 3: Volumen de control.

A partir de este volumen de control, se modelan ecuaciones dinámicas para las variables representativas. La fracción transversal se divide en Nz capas en la dirección i vertical, partiendo del centro del espesor del tablero, y Ny capas en la dirección j transversal.

En la producción de MDF comúnmente se utiliza una resina a base de urea-formaldehído y melamina como adhesivo. La resina de urea-formaldehído genera grupos metilol que reaccionan mediante condensación durante el prensado en caliente, formando enlaces metileno y metilen-éter que reticulan la resina y unen las fibras de madera. Estas reacciones generan una red polimérica termoestable, aunque pueden liberar algo de formaldehído si el curado o la absorción por un catalizador no son completas. Aunque las reacciones de polimerización son más complejas, las reacciones de la Tabla 1 dan idea de los fenómenos que tienen lugar.

Tabla 1: Reacciones consideradas en el modelo.

Reacciones
$U + F \leftrightarrow M_1$
$E + F \rightarrow M_2$
$U + M \rightarrow Rc + 0.5W$
$2M \rightarrow Rc + 0.5W$
$4B + 6F \rightarrow 4H_2SO_3 + HTMA + 6W$

Donde U se refiere a urea, F a formaldehido, E a melamina, M_1 a los metiloles formados por la reacción de urea con formol, M_2 los metiloles formados por la reacción de melamina con formol, Rc corresponde a la resina curada, W es el agua generada, B es el catalizador, $HTMA$ es el compuesto hexametilentetramina y H_2SO_3 es el ácido sulfuroso.

La resina proviene de una bolsa que contiene un equilibrio de formol urea y melamina. La resina se fabrica con una relación molar, r_{FU} , que depende del tipo de resina utilizada y viene dada por (1), donde F_0 y U_0 son la concentración molar inicial de formaldehido y urea (mol/L), respectivamente.

$$\frac{F_0}{U_0} = r_{FU} \quad (1)$$

Un balance de masa dentro de la bolsa resulta en (2).

$$PM_U U_0 + PM_F F_0 + P_E \rho_{cola} = P_S \rho_{cola} \quad (2)$$

Donde PM_U y PM_F son los pesos moleculares de urea y formaldehído respectivamente en (kg/mol), P_E y P_S es el contenido de melamina y sólidos dado en porcentaje en peso (%), ρ_{cola} es la densidad de la cola (kg/L).

Para la concentración x_p de cada producto de cada reacción química puede escribirse un balance de masas como en (3).

$$\frac{dm x_p}{dt} = - \sum_p A_p \exp\left(\frac{-E_p}{RT}\right) x_{p1} x_{p2} \quad (3)$$

Con m la masa (kg), T la temperatura en Kelvin y A_p , E_p son el factor pre-exponencial y energía de activación de la

reacción respectivamente, las x_p son las concentraciones de los productos.

El proceso mecánico comienza cuando la manta pasa por una cinta metálica rodante, donde es sometida a una distribución de altas temperaturas y presiones mediante una serie de sistemas de calefacción y pistones para alcanzar el espesor adecuado. La figura 4 ilustra la distribución de temperaturas y presiones a lo largo de la prensa; la presión se aplica en la dirección z vertical del tablero, mientras que la temperatura favorece las reacciones químicas de curado y evapora agua, cuyo vapor debe extraerse por los laterales.

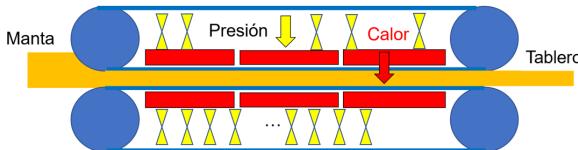


Figura 4: Temperatura y presiones aplicadas a la manta dentro de la prensa.

Para el modelado mecánico (figura 5) se consideran tres contribuciones físicas entre cada capa: la fuerza elástica de contracción y restitución entre capas, la fuerza viscosa debida a la mezcla de fibras de madera y resinas, y la presión de gas entre las capas.

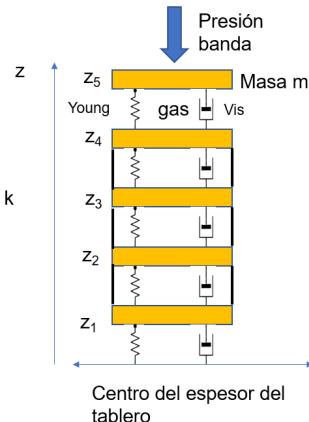


Figura 5: Esquema del modelo mecánico.

El modelo considera dos situaciones, una se parte de medidas del espesor dentro de la prensa para calcular densidades (lazo cerrado) y el otro caso en el que se recurre a un modelo que calcula los espesores en función de las presiones lo cual serviría para hacer predicciones en lazo abierto. En lazo cerrado se considera las medidas online de los espesores con el tiempo para el cálculo de la velocidad y densidades en cada elemento. En lazo abierto se considera las ecuaciones mecánicas de la ley de Newton dado por (4), donde A es el área superior (cm^2), m es la masa (kg), v_z es la velocidad (cm/s) que se mueve un elemento de la manta en sentido vertical durante la compresión, P_{el} es la presión ejercida por la fuerza elástica (N/cm^2), P_{vis} es la presión ejercida por la fuerza viscosa (N/cm^2), P_{gas} es la presión ejercida por el gas (N/cm^2), k se refiere al elemento estudiado.

$$A \frac{d(mv_z)}{dt} = -P_{el,k+1} + P_{el,k} - P_{vis,k} + P_{vis,k+1} + P_{gas,k} - P_{gas,k+1} \quad (4)$$

Las presiones elásticas y viscosas son calculadas por (5), donde $Young$, Vis son coeficientes que son funciones de la humedad h_{bs} , temperatura T , densidad ρ y la concentración de resina Rc en la manta. $dz0_k$ corresponde a la altura inicial del elemento k , dz_k la altura del elemento actual, vz_k es la velocidad de la capa k .

$$P_{el,k} = Young_k \frac{dz0_k - dz_k}{dz0_k} \quad (5)$$

$$P_{vis,k} = Vis_k \frac{vz_k - vz_{k-1}}{dz0_k}$$

$$Young = f(h_{bs}, T, \rho, Rc)$$

$$Vis = f(h_{bs}, T, \rho, Rc)$$

En el modo lazo cerrado, se imponen las distancias medidas del grosor del tablero en el borde a todo el ancho y se distribuye esta distancia total entre las diferentes alturas de las capas en función de la temperatura, humedad y, fuera de la prensa, el grado de curado, ver (6).

$$dz_k = e_{exp} \text{factor}(h_{bs}, T, P_{cur}) \quad (6)$$

Para el balance másico se considera cuatro componentes presentes: fibra, químicos, agua (líquida y vapor) y gases inertes dado por (7).

$$m = m_g + m_{sol} \quad (7)$$

$$m_g = m_a + m_s$$

$$m_{sol} = m_{fibra} + m_q + m_w$$

Donde m_g es la masa de gas formada por la masa de aire m_a y la masa de vapor de agua m_s . m_{sol} es la suma de la masa de fibra m_{fibra} , la masa de químicos m_q y la masa de agua líquida m_w .

La variación de la cantidad de cada componente dentro del tablero con el tiempo es calculada usando (8) para el vapor de agua, (9) para el aire, (10) para los químicos y (11) para el agua líquida.

$$\frac{dm_s}{dt} = evap + F_{s,in,k} + F_{s,in,j} - F_{s,out,k} - F_{s,out,j} \quad (8)$$

$$\frac{dm_a}{dt} = F_{a,in,k} + F_{a,in,j} - F_{a,out,k} - F_{a,out,j} \quad (9)$$

$$\frac{dm_q}{dt} = -rateW \quad (10)$$

$$\frac{dm_w}{dt} = rateW - evap + balance_w \quad (11)$$

Donde $evap$ es la cantidad de agua evaporada o condensada calculada a partir de las diferencias de P_{gas} y presión de

saturación (P_{sat}). F son los flujos de entrada (in) o salida (out) del elemento en la dirección vertical (k) y horizontal (j). $rateW$ es la tasa de generación de agua por reacción química y $balance_w$ se refiere al balance de flujos de agua por difusión.

Los flujos de gas son calculados por (12) considerando un flujo laminar.

$$F = \rho K \frac{A}{Vis_g} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (12)$$

Donde K es la permeabilidad del gas. Los flujos para el agua líquida se calculan con (13).

$$F_w = \sum D_w \frac{\partial h_w}{\partial y} dx dz + D_w \frac{\partial h_w}{\partial z} area \quad (13)$$

Finalmente, un balance térmico (14) proporciona los valores de la temperatura.

$$\frac{dmc_e T}{dt} = -Q_{evap} + Q_{react} + Q_g + Q_{dif} + Q_w \quad (14)$$

Donde c_e es el calor específico, Q_{evap} la energía gastada en la evaporación de agua por unidad de tiempo, Q_{react} el calor generado en las reacciones químicas, Q_g el balance de calor por transporte de gases, Q_{dif} el balance de calor por difusión y Q_w el balance de calor por difusión de agua, todo ello por unidad de tiempo.

Las ecuaciones utilizadas para calcular las propiedades del tablero dentro de la prensa —como la capacidad calorífica, la permeabilidad del medio y la conductividad térmica— se fundamentan en la publicación de Thömen (2000). Dado que la mayor parte de las expresiones encontradas son específicas para ciertas condiciones de materia-primas, operación, prensa, etc. a estas expresiones se han añadido coeficientes correctores para adecuar los resultados al proceso específico estudiado ajustando a los datos experimentales bien por prueba y error o bien con procedimientos de optimización. En el caso de las propiedades mecánicas se ha desarrollado un modelo de caja negra con redes neuronales que genera dichas propiedades en función de otras del tablero.

Este modelo se aplica a cada uno de los $N_y N_z$ volúmenes finitos del elemento de tablero considerado, resultando en más de 6000 ecuaciones que deben resolverse en tiempo real, para lo que se ha utilizado el entorno de simulación de EcosimPro, un software de última generación orientado a objetos. Las ecuaciones se han integrado utilizando IDAS_SPARSE como motor de cálculo.

Dos elementos importantes relativos al modelo son su parametrización y validación. Una dificultad objetiva considerable viene dada por el hecho de que las medidas disponibles son escasas. Dado que incorpora numerosos parámetros cuyos valores y dependencias no son bien conocidos, la parametrización ha combinado el ajuste utilizando datos experimentales con modelos de caja negra de otros, resultando por tanto un modelo global híbrido.

La validación se ha efectuado recurriendo a valores de operación de instalaciones de fabricación de tableros MDF

de la compañía Sonae-Arauco, con cuya colaboración ha desarrollado el modelo. Para ello se han comparado resultados del modelo y datos experimentales de varios meses de operación, involucrando distintos tipos de tableros y condiciones de operación con resultados satisfactorios. Igualmente, buena parte de la validación se ha realizado en reuniones con el personal de la fábrica examinando las respuestas del modelo ante distintas condiciones de operación y valores experimentales.

4. Digital Twin

La arquitectura software del gemelo digital se muestra en la Figura 6.

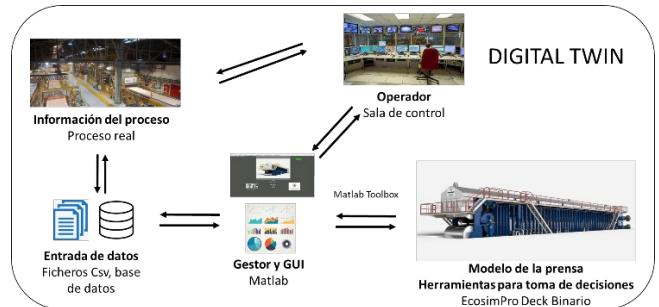


Figura 6: Arquitectura del software del gemelo digital.

El modelo simulado en el entorno de EcosimPro posteriormente se transformó en un modelo de simulación independiente (deck), utilizando las facilidades que proporciona el entorno EcosimPro. Este deck opera como una caja negra autónoma, ejecutándose de manera independiente del entorno de simulación dentro del DT.

El software del DT cuenta con dos modos de ejecución: *online* y *offline*. En el modo *online*, el modelo recibe datos del proceso en tiempo real y se ejecuta de forma continua cada 60 segundos, mostrando los resultados en pantalla mediante valores numéricos y gráficos. En el modo *offline*, es posible cargar datos históricos desde la base de datos en fechas específicas, o bien importar los datos desde un archivo CSV. Los valores iniciales del modelo son actualizados en tiempo real, y por ello se desarrolló una serie de módulos adicionales que realizan esta función, como se muestra en la Figura 7.

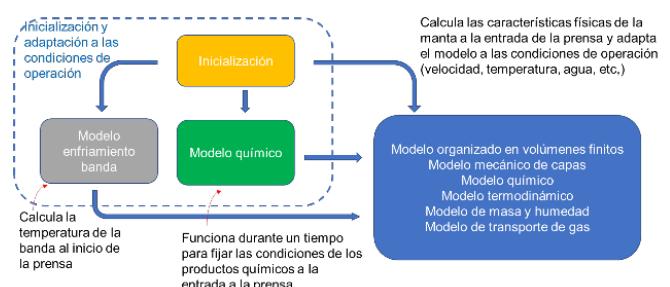


Figura 7: Modelos y su actualización en el gemelo digital

Del mismo modo, dado que la finalidad del gemelo digital es proporcionar información actualizada de las variables del proceso, particularmente las no medidas en línea, y ayudar en

la toma de decisiones, el DT incorpora otros módulos de presentación de información y de ayuda en la toma de decisiones, como la funcionalidad ¿Qué pasa si ...? Que se basan en la simulación del modelo, como puede verse en la figura 6. La funcionalidad de optimización de la producción está actualmente en desarrollo.

5. Interfaz Gráfica



Figura 8: Interfaz gráfica del gemelo digital hecha en Matlab.

Para interactuar con el deck, se desarrolló una interfaz gráfica en Matlab (figura 8) que permite la lectura de datos de entrada, ya sea directamente desde la base de datos de operación de la fábrica o desde archivos CSV. Estos datos se envían al deck, y la simulación se ejecuta mediante funciones específicas incluidas en una toolbox de Matlab, diseñada para controlar y gestionar el deck desde dicho entorno.

Una vez finalizada la simulación, los resultados son recogidos y presentados mediante gráficas, ver figura 9. A través de la interfaz, los usuarios pueden modificar los parámetros del modelo, incluyendo la posibilidad de aplicar compensaciones a variables específicas, facilitando así el análisis y ajuste del sistema simulado.

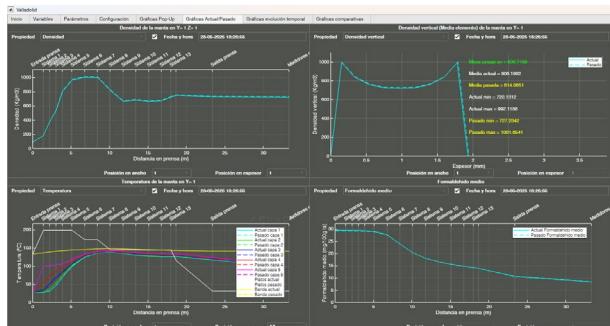


Figura 9: Resultados presentados en gráficas.

6. Conclusiones

Se han establecido las bases de un gemelo digital que actualmente opera en tiempo real en la factoría de Valladolid

de Sonae-Arauco en paralelo con el proceso y proporciona información útil para su funcionamiento. La imposibilidad de realizar mediciones internas en la prensa y la dimensionalidad del problema son obstáculos importantes para la parametrización del modelo.

En la actualidad se trabaja para extender el DT en otras plantas de la empresa.

Una experiencia extraída en el desarrollo del DT es que es deseable el uso de herramientas estándar para la construcción de interfaces en tiempo real con los procesos.

La colaboración entre empresas, centros de investigación y desarrolladores de software es crucial para adaptar los entornos de simulación/optimización a aplicaciones específicas, haciendo del Gemelo Digital una herramienta valiosa para la operación en tiempo real y nuevos escenarios de diseño.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto WISEBRAIN (CPP2021-008639), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y NextGenerationEU y del proyecto PID2021-123654OB-C3 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

- De Sousa Selvatti, T., Antônio, L., Borges, C., Cristina, H., Soares, C., Nogueira De Souza, Á., Moreira, L., & Junior, C. (2018). Global production concentration... GLOBAL PRODUCTION CONCENTRATION OF MEDIUM DENSITY FIBERBOARD (MDF) (1995-2016) 1. Revista Árvore, 42(5), 420506. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000500006>
- de Prada, C., Galán-Casado, S., Pitarch, J. L., Sarabia, D., Galán, A., & Gutiérrez, G. (2022). Digital twins for process industry. RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 19(3), 285–296. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2022.16901>.
- Empresarios Agrupados Ecosimpro manual. <https://ecosimpro.com>
- Grieves, M., 2019. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and physical twins. In: S. Flumerfelt, et al. (Ed.), Complex systems engineering: Theory and Practice. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Ch. 7, pp. 175-200. DOI: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200
- Shafto, M., Conroy, M., Dolye, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne J., Wang, L., 2010. DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Technology Area 11.
- Siempelkamp, s.f. Siempelkamp – Engineering and Services. <https://www.siempelkamp.com/>
- Thoemen, H., 2000. Modeling the physical processes in natural fiber composites during batch and continuous pressing. Ph.D. thesis, Oregon State University, Corvallis, OR.
- Wilson, J. B. (2010). View of Life-Cycle Inventory of Medium Density Fiberboard in Terms of Resources, Emissions, Energy and Carbon. Wood and Fiber Science, Supplement 1, 107–124. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/706/706>