ORBIS
Revista Científica Electrónica de Ciencias Humanas / Scientific e-journal of Human Sciences / Depósito Legal PPX200502ZU1935 / Depósito Legal Electrónico ZU2021000156/ ISSN 1856-1594 / e-ISSN 2790-6175/ By Fundación Unamuno/ Venezuela.
Cortes, Nataly; Acosta, Edison; Robayo, Andrés; Riveros, Oscar; Salas, José. (2025).
GEMELO DIGITAL PARA EL PROCESO DE CORTE DE RESIDUOS EN BOTELLAS PLÁSTICAS DE SOPLADO
www.revistaorbis.com / núm. 61 (Año 21) Edición aniversario. Julio 2025. 42-51

DIGITAL TWIN FOR THE WASTE CUTTING PROCESS IN PLASTIC BLOW MOLDING BOTTLES

GEMELO DIGITAL PARA EL PROCESO DE CORTE DE RESIDUOS EN BOTELLAS PLÁSTICAS DE SOPLADO


Cortes, Nataly[1]


Acosta, Edison[2]


Robayo, Andrés[3]


Riveros, Oscar[4]


Salas, José[5]

RESUMEN
El presente trabajo fue desarrollado con el fin de crear un gemelo digital aplicado a una máquina encargada del corte de residuos plásticos, como rebabas o cuellos, en botellas producidas mediante procesos de soplado. La utilización de un gemelo digital permite la simulación virtual del comportamiento de la máquina, optimizando el proceso de corte y mejorando la eficiencia operativa. El estudio se centró en la integración de sensores, modelado de datos y simulaciones. Los resultados demostraron una mejora significativa en la eficiencia del proceso, lo que contribuyó a la automatización de la línea de producción y a una disminución de desperdicio material.
Palabras clave: Gemelo digital, corte de residuos, proceso de soplado, automatización, botellas plásticas.

ABSTRACT
The present work was developed with the aim of creating a digital twin applied to a machine responsible for cutting plastic waste, such as burrs or necks, from bottles produced by blow molding processes. The use of a digital twin allows for the virtual simulation of the machine's behavior, optimizing the cutting process and improving operational efficiency. The study focused on the integration of sensors, data modeling, and simulations. The results demonstrated a significant improvement in process efficiency, which contributed to the automation of the production line and a reduction in material waste
Key words: Digital twin, waste cutting, blow molding process, automation, plastic bottles.
Fecha de recepción: 30/04/2025
Fecha de aprobación: 15/07/2025
Fecha de publicación online: 15/07/2025
DOI: http://doi.org/10.5281/zenodo.17096094

[1] Colombia. Técnico en análisis de muestras químicas. Tecnólogo en química industrial. Tecnología en procesamiento de plástico. Ingeniería de plásticos. Correo electrónico: Natalya.cortesr@ecci.edu.co ORCID: 0009-0001-6908-5087
[2] Colombia. Técnico de inyección de plástico. Tecnólogo en transformación de plástico por sopladocorreo electrónico: edisond.acostahe@ecci.edu.co ORCID: 0009-0005-3420-169X
[3] Colombia. Tecnólogo en Diseño e Integración de Automatismos Mecatrónicos con enfoque en integración de tecnologías de la industria 4.0; desarrollador de proyectos en el marco de la formación y participación en diversos cursos de la misma temática. adrobayo80@soy.sena.edu.co https://orcid.org/0009-0004-7367-8549
[4] Colombia. Profesional en el área de la ingeniería Mecánica, Maestría en Ingeniería de sistemas industriales Enim (Francia). Especialista en la Implementación de sistemas PLM (Gestión del Ciclo de Vida del Producto). oriveroosa@sena.edu.co https://orcid.org/0009-0005-7501-2297
[5] Ingeniero Mecánico e Industrial con Maestría en Gerencia de Mantenimiento y Doctorado en Ciencias de la Educación. Profesor, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Cafam. jsalash@ecci.edu.co https://orcid.org/0000-0002-6601-2720

INTRODUCCIÓN

La industria del plástico tiene un papel muy importante en la fabricación de envases, siendo el proceso de soplado uno de los métodos más utilizados para la producción de botellas plásticas. En este proceso, se generan residuos como cuellos y rebabas, que deben ser removidos para cumplir con los estándares de calidad. Actualmente, la eliminación de estos residuos depende en gran medida del trabajo manual. Esto genera reprocesos, aumentos en los tiempos de producción y rechazos generados por el mal corte realizado manualmente. (Rosato & Rosato, 2024).

Diversos estudios resaltan cómo la simulación y la integración de datos en los sistemas de producción permiten optimizar los procesos industriales, mejorar la toma de decisiones y reducir costos asociados a ineficiencias. (Wang, Lee & Angelica, 2021). Es por lo que autores como Orive et al., (2021) plantean el desarrollo de gemelos digitales como metodología aplicable a la simulación e integración de activos de fabricación en la industria 4.0, permitiendo así optimizar procesos y disminuir la dependencia a las intervenciones manuales.

De acuerdo con Durán Félix, Pérez Domínguez y Romero López (2024), los gemelos digitales pueden aplicarse en áreas como la optimización del plan de producción y el control operativo en una planta de producción. Desde una perspectiva similar, Tao et al. (2017), indican que los gemelos digitales son el nuevo paradigma de manufactura inteligente, al permitir la integración en tiempo real de la operación física con su réplica virtual.

Por lo mencionado se formula la siguiente pregunta: ¿De qué manera la simulación del ciclo de corte mediante un gemelo digital, que integra tecnologías avanzadas, puede mejorar la eficiencia y sostenibilidad en el proceso de manufactura de botellas al analizar el desempeño de una máquina de corte de residuos plásticos? El objetivo fue crear un gemelo digital aplicado a una máquina encargada del corte de residuos plásticos, como rebabas o cuellos, en botellas producidas mediante procesos de soplado.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Para el desarrollo de esta investigación, se está considerando el uso de tecnologías emergentes como los gemelos digitales como herramienta para la optimización del proceso de corte de residuos de botellas. El gemelo digital, según autores como Giel y Dąbrowska (2024), se explica como un modelo virtual dinámico que refleja con precisión el comportamiento de un sistema físico, permitiendo la visualización,

simulación, monitoreo y ajuste en tiempo real; para Tao et al. (2018) el gemelo digital es una réplica virtual de un sistema físico que tiene la capacidad de operar en sincronía mediante el uso de sensores, modelos de simulación y datos en tiempo real. Este concepto además se complementa con lo desarrollado por autores como Grieves y Vickers (2017), quienes indican que es una herramienta que permite anticipar y mitigar comportamientos en sistemas al de alta complejidad. En una línea similar para los autores Apte y Spanos (2021), los gemelos digitales son una innovación tecnológica que da oportunidades estratégicas para mejorar la competitividad y sostenibilidad en el sector productivo. Es por eso por lo que, en el contexto de esta investigación, el gemelo digital permite optimizar el proceso de corte de residuos.

En entornos industriales, los gemelos digitales han demostrado su potencia en algunas dimensiones operativas, por ejemplo, Wang et al. (2021) han documentado un caso de implementación exitosa de monitoreo en tiempo real de máquinas de corte, logrando optimizar el proceso a partir del uso de gemelos digitales. Complementariamente, Firat Unal et al. (2023) detallan que el uso de los gemelos digitales en entornos industriales de manufactura ha demostrado una reducción en el consumo energético de hasta un 10%, esto tiene un impacto en la parte operativa, haciendo más sostenible el ciclo de vida del producto.

En el contexto de procesos como el corte de residuos, resulta importante maximizar la eficiencia, reducir el desperdicio y es ahí donde la optimización energética resulta particularmente valiosa. Tal y como lo plantean Abumadi, Semeraro, Olabi y Dassisti (2022), la integración de la inteligencia artificial permite optimizar procesos a partir del ajuste de variables en tiempo real; en cuanto a estas variables que deben ser ajustadas Aguilar 2024), coincide en la importancia de mantener ese control, entre esas variables autores como Ortiz, Quishpe, Sailema y Guamán (2023), destacan la temperatura, presión y velocidad.

En este sentido, las botellas plásticas, mayoritariamente fabricadas con tereftalato de polietileno (PET), generan una cantidad de residuos importantes. Autores como Rosato & Rosato (2004), afirman que el proceso de soplado por estiramiento genera residuos de materiales en forma de rebabas y recortes, particularmente en la zona del cuello y la base de la botella.

Estos residuos suelen enviarse para su reprocesamiento externo. Geyer, Jambeck y Lavender (2017), afirman que estas botellas constituyen una proporción significativa de los plásticos producidos, haciendo de los mismos un residuo visible y duradero en el ambiente, lo que resalta la necesidad de hacer los procesos más eficientes para evitar el desperdicio. Ante esas circunstancias, autores como Giel &

Dąbrowska (2024), la necesidad del uso de tecnologías para la identificación de cuellos de botellas y variables que pueden prevenir los desechos o errores de producción.

En ese contexto, la automatización se puede convertir en un componente importante para lograr una gestión eficiente, según Shah et al. (2024), los sistemas automatizados basados en gemelos digitales, integrados con sensores loT e inteligencia artificial, pueden aumentar la precisión operativa, permitiendo la supervisión en tiempo real de los procesos y además reduce la necesidad de intervención humana.

En la misma línea, Soleymanizadeh et al., (2023), destacan que la manufactura inteligente, acompañada de control de calidad, monitoreo de las condiciones y la retroalimentación, generan un entorno optimizado para la producción, que además permite el mantenimiento predictivo y la eficiencia energética.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se desarrolló un análisis del proceso de rebabado de botellas plásticas a partir de un enfoque aplicado, orientado a la optimización productiva. La investigación se desarrolló en dos etapas. En la primera, durante una jornada laboral de ocho horas se realizó un análisis de tiempos y movimientos, con el fin de identificar variables durante el proceso de soplado de las botellas, dentro de esas variables se puede mencionar: fatiga del operario, desperdicio de materia prima y los rechazos generados por un mal producto. Con el propósito de garantizar la trazabilidad, se registraron sistemáticamente los tiempos de ejecución, los tiempos de ejecución en cada fase del proceso, generando un registro del desempeño que permite hacer análisis comparativos.

Esta metodología se alinea con lo desarrollado por Hernández y Mendoza (2018), quienes detallan la combinación sistemática de variables con procedimientos de observación controlada; permite obtener diversos indicadores y datos que ayudan a la toma de decisiones informada.

En la segunda fase, se diseñó un modelo digital para integrarlo al proceso de rebabado, así mismo poder evidenciar las variables del proceso en línea. Esta simulación permitió analizar aspectos como ciclo y oportunidades de mejora para la fabricación real. Para el desarrollo de modelo se utilizaron herramientas especializadas como los softwares NX para el diseño digital y TIA portal para la programación y visualización del proceso, la documentación de Siemens (s.f.), indica que estas plataformas permiten la integración de conceptos mecatrónicos en

el diseño, facilitando así la visualización y simulación. Este procedimiento coincide con lo descrito por Córdoba Poveda (2020), quien desarrolló algo similar a lo propuesto haciendo uso de esas herramientas.

En estudios recientes se documentan experiencias que respaldan la aplicación de procedimientos similares al que se propone; por ejemplo, Bolaños Martínez, Londoño Martínez y Gutiérrez Marroquín (2020) implementaron un gemelo digital en una fábrica de refrescos, analizando y optimizando la producción, mientras que Galindo Morales, Ruíz Sarmiento y González Monroy (2023), desarrollaron algo similar en una línea de producción ayudando a reducir los tiempos improductivos. Gutiérrez Aparicio, Valera Fernández y Blanes Noguera (2023), aplicaron una simulación de un brazo robótico haciendo uso de gemelos digitales.

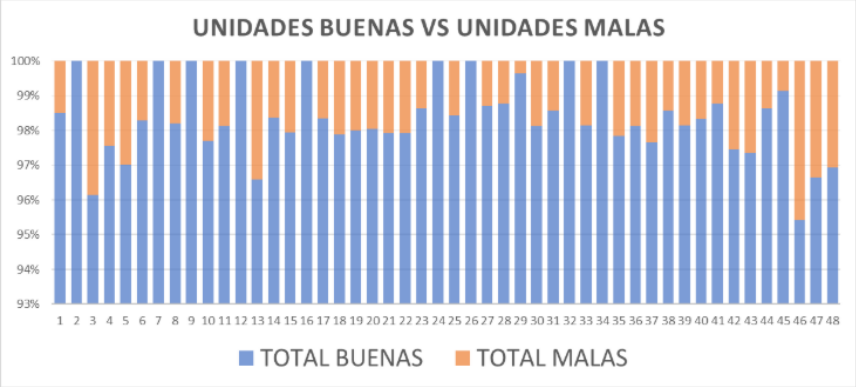
Estos casos de estudio sustentan la metodología propuesta para el desarrollo de esta investigación. La metodología utilizada buscó combinar técnicas de análisis de procesos con la integración de un gemelo digital, lo que permitió recolectar datos que fueron sistematizados en categorías que permitieron identificar patrones de desempeño, limitaciones del proceso y potenciales oportunidades de optimización. Finalmente, los resultados se analizaron mediante un análisis comparativo entre las mediciones reales de la primera fase y la simulación.

RESULTADOS

A partir del análisis de tiempos y movimientos realizado en la investigación del proceso productivo, se identifica que la causa más constante de rechazo del producto es por mal rebabado, causando baja productividad y estándares de calidad ineficientes. Los datos obtenidos evidencian que en el turno nocturno es un punto crítico porque es donde más aumentan las unidades no conformes.

Dicho aumento se asocia principalmente a la fatiga muscular y agotamiento físico de los operarios, factores que tienen una incidencia en la precisión a la hora de ejecutar las tareas. En la Gráfica 1 se puede visualizar que, si bien muchas de las piezas producidas resultaron aceptables, existe una variabilidad en el porcentaje de unidades rechazadas que, en ciertos puntos, supera el 3%.

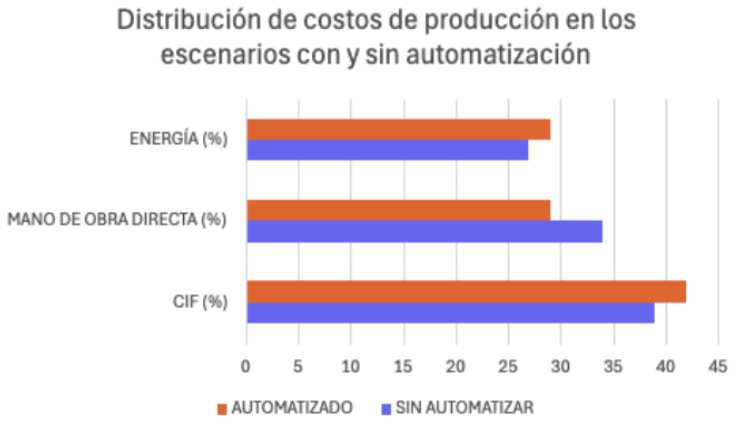
Grafica 1. Unidades buenas vs unidades defectuosas



Fuente: Elaboración propia (2024)

Los resultados de la simulación automática evidenciaron que la automatización del proceso incrementa significativamente la productividad y garantiza la calidad del producto. La implementación del gemelo permitió identificar cuellos de botella en el ciclo de corte, optimizando la configuración de la máquina. La simulación indicó una reducción del tiempo de ciclo del proceso de 22 segundos a 18 segundos, lo que representa una mejora del 18% en la productividad. Además, esta optimización disminuyó en un 12% los residuos generados como desperdicio. En el gráfico 2 se pueden visualizar los costos de producción en los escenarios sin y con automatización.

Gráfico 2. Costos procesos sin automatizar Costos procesos automatizado



Fuente: Elaboración propia (2024)

Adicionalmente, como se puede visualizar en la Tabla 1, la integración del gemelo digital contribuye a reducir la brecha existente entre rendimiento proyectado y el producido, acercándose más a ese valor que lo que actualmente se hace.

Tabla 1. **Valor producido vs valor proyectado**

Escenario	Valor Producido ($)	Valor Proyectado ($)	Diferencia ($)
Sin automatizar	156,672,944	441,376,453	284,703,509
Automatizado	375,169,985	441,376,453	66,206,468

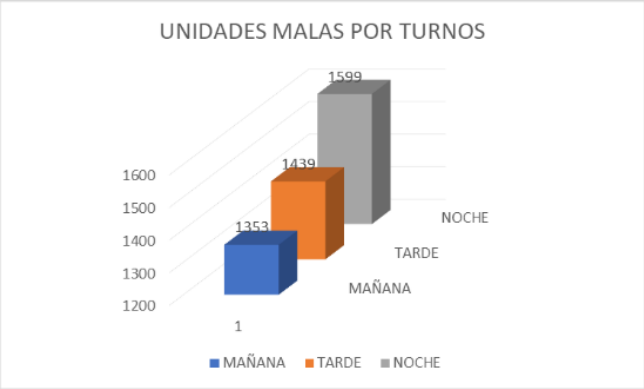
Fuente: Elaboración propia (2024).

DISCUSIÓN

Los resultados demuestran que la implementación de automatización en el proceso de rebabado reduce costos aumentando la eficiencia del proceso productivo. Reduciendo la diferencia del valor proyectado frente al valor producido, siendo el valor sin automatizar el 35% frente al valor proyectado, y el valor producido automatizado del 85% frente al mismo valor producido.

Los resultados del análisis realizado evidencian que el alto porcentaje de defectos en las unidades, no se atribuye al desempeño del personal operario de la planta. Los movimientos repetitivos asociados a las tareas operativas que exponen a los trabajadores a riesgos y posibles enfermedades laborales. En particular, tal y como se puede visualizar en el Gráfico 3, los datos demuestran que en el turno nocturno es donde más se producen unidades defectuosas, lo cual puede estar relacionado con motivos de cansancio físico, concentración y desgaste muscular.

Gráfico 3. Unidades defectuosas por turno



Fuente: Elaboración propia (2024)

CONCLUSIÓN

El proceso de desarrollo de un modelo digital aplicado al proceso de corte de residuos en botellas plásticas que demostró ser una solución efectiva para optimizar el proceso eliminación de rebabas. Los principales logros incluyen la reducción del tiempo de ciclo, la disminución del desperdicio de material, el ahorro de energía.

Adicionalmente, el uso del gemelo digital también facilita la toma de decisiones basadas en datos y permite realizar simulaciones futuras para optimizar procesos adicionales.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo no fue financiado.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses financieros ni personales que puedan influir inapropiadamente en el desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

Abumadi, F. A., Semeraro, C., Olabi, A. G., & Dassisti, M. (2022). Key research challenges in digital twin applications for demanufacturing. IFAC-PapersOnLine, 55(10), 2551–2556. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.093

Aguilar Álvarez, G. (2024). Aplicación del modelo de gemelos digitales a un mecanismo de suspensión para su monitorización y análisis a fatiga (Trabajo Final de Grado). Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/412660/TFG_Alvarez_Aguilar_Gerard.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Apte, P. P., & Spanos, C. J. (2021). La oportunidad de los gemelos digitales. Harvard Deusto Business Review, (316), 68–73. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8141809

Bolaños Martínez, G., Londoño Martínez, R. A., & Gutiérrez Marroquín, W. (2020). Desarrollo de un gemelo digital de una fábrica de refrescos. Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación en la Industria, CEAI. Disponible en: https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/b0ea632a-d78c-4264-8300-8cad953f511c/content

Córdoba Poveda, C. C. (2020). Diseño e implementación de un gemelo digital 3D para una planta de agua potable (Trabajo de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Disponible

en: https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/c0cce1eb-1e07-4863-a2cd-68608a124465/content

Durán Félix, M. A., Pérez Domínguez, L. A., & Romero López, R. (2024). Creación de un gemelo digital en una línea de producción de manufactura automotriz por medio de FlexSim® para el mejoramiento de los métricos de productividad y calidad: 7CP24-29. Memorias Científicas y Tecnológicas, 3(2), 50–51. https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/memoriascyt/article/view/6446/8055

Galindo Morales, M., Ruíz Sarmiento, J. R., & González Monroy, J. (2023). Utilización de gemelos digitales para la medición y optimización del rendimiento de una línea de producción (Trabajo Fin de Grado). Universidad de Málaga. Disponible en: https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/31772

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Lavender, K. L. (2017). Production, use and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Giel, R., & Dąbrowska, A. (2024). A Digital Twin framework for cyber-physical waste stream control system towards Reverse Logistics 4.0. Logforum, 20(3), 297–306. https://doi.org/10.17270/J.LOG.001054

Grieves, M. W., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. En F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

Gutiérrez Aparicio, C., Valera Fernández, Á., & Blanes Noguera, J. F. (2023). Diseño, desarrollo y simulación de un gemelo digital de un brazo colaborativo Universal Robots mediante comunicaciones OPC UA y CoppeliaSim (Trabajo Fin de Máster). Universitat Politècnica de València. Disponible en: https://riunet.upv.es/handle/10251/198966

Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Education.

Orive, D., López García, A., Estevez, E., Orive, A., & Marcos, M. (2021). Desarrollo de gemelos digitales para la simulación e integración de activos de fabricación en la industria 4.0. https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498043.709

Ortiz, J. S., Quishpe, E. K., Sailema, G. X., & Guamán, N. S. (2023). Digital Twin-Based Active Learning for Industrial Process Control and Supervision in Industry 4.0. Applied System Innovation, 6(5), 77. https://doi.org/10.3390/asi6050077

Rosato, D. V., & Rosato, D. (2004). Reinforced Plastics Handbook (3rd ed.). Hanser. https://books.google.co.cr/books?hl=en&lr=&id=g7R8g-l_KO8C&oi=fnd&pg=PP1

Shah, K. B., Visalakshi, S., Guragain, D. P., & Panigrahi, R. (2024). Advancing smart city sustainability with Internet of Things and artificial intelligence aided low-cost digital twin systems for waste

management. Microsystem Technologies, 30(5), 1123–1137. https://link.springer.com/article/10.1007/s00542-024-05827-4

Siemens Ingenuity for Life. (s.f.). Diseño de conceptos mecatrónicos | Siemens Digital Industries Software. Disponible en: https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/mechanical-design/mechatronic-concept-design.html

Soleymanizadeh, H., Qu, Q., Hosseini Bamakan, S. M., & Zanjirchi, S. M. (2023). Digital twin empowering manufacturing paradigms: Lean, agile, just-in-time (JIT), flexible, resilience, sustainable. Procedia Computer Science, 221, 1258–1267. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.08.114

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(9–12), 3563–3576. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1

Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2017). Digital twin shop-floor: A new paradigm for smart manufacturing. IEEE Access, 5, 20418–20427. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2754911

Toala Arias, F. J., Maldonado Zuñiga, K., Toala Zambrano, M. M., & Álava Cruzatty, J. E. (2022). Gemelos digitales en la industria. Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria Pentaciencias, 4(1), 75–83. Disponible en: https://www.editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/29/77

Torné Pérez, J., & de Francisco Ortiz, Ó. (2022). Diseño e implementación de un gemelo digital en un proceso de fabricación automatizado (Trabajo Fin de Grado). Universidad Politécnica de Cartagena. Disponible en: https://repositorio.upct.es/bitstreams/294fc05c-bce1-47b1-834d-5fa6c4546828/download

Wang, K.-J., Lee, Y.-H., & Angelica, S. (2021). Digital twin design for real-time monitoring – A case study of die cutting machine. International Journal of Production Research, 59(15), 4567–4584. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1877133