

Rodrigo E. Velasco Rebollo, Omar Jacobo Santos Sánchez y Liliam Rodríguez Guerrero

Deshidratación atmosférica de alimentos: una forma de conservarlos mediante aire caliente

Resumen

En este artículo exploramos la deshidratación de alimentos, técnica milenaria que usa aire caliente para reducir la humedad y conservarlos sin aditivos; se analiza también su funcionamiento, su eficacia y cómo los investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo han perfeccionado este método a lo largo de años para lograr hacerlo mucho más eficiente energéticamente.

Abstract

In this article, we explore food dehydration, an ancient technique that uses hot air to reduce moisture and preserve food without additives; we also analyze how it works, its effectiveness, and how researchers from the Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo have perfected this method over the years to make it much more energy-efficient.

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, las personas han buscado maneras de conservar sus alimentos para asegurar su disponibilidad en tiempos de escasez. Entre los métodos de conservación, la deshidratación se ha mantenido como una de las técnicas más usadas. A grandes rasgos, este proceso elimina la mayor parte del agua de un alimento, extendiendo así su vida útil. Pero no está libre de problemas, ya que el alimento deshidratado no siempre conserva su valor nutricional.

Para comprender la importancia de la deshidratación como método de conservación de alimentos hay que tomar en cuenta el papel del agua dentro de ellos. El agua no sólo es un medio de transporte de nutrientes, sino también un factor que promueve el crecimiento de microorganismos; por ello, al reducir la actividad del agua, se minimiza el riesgo de deterioro y se prolonga la vida útil. Además, al disminuir el peso y volumen del alimento, se facilita su transporte y almacenamiento.

Existen diversos métodos de deshidratación: uno de ellos es el solar, que utiliza la radiación del sol; la liofilización, que elimina el agua mediante un proceso de



congelación y posterior sublimación (paso directo de hielo a vapor); el método osmótico, que consiste en sumergir alimentos en una solución concentrada de azúcar o sal, y además está el método atmosférico, que consiste en el uso de aire caliente en condiciones controladas. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y aplicaciones específicas según el tipo de alimento de que se trate y de los objetivos de conservación. Entre estas tecnologías, la deshidratación atmosférica destaca por su eficiencia y versatilidad, ya que es un proceso que no sólo puede aplicarse en la industria alimentaria, sino también en ámbitos tan variados como los de la biotecnología, la agroindustria, los textiles, los minerales, los polímeros y la madera, entre otros.

Si bien la tecnología de secado es fundamental en diversas industrias, también es una de las que tienen más consumo energético, el cual representa entre el 12 y el 25 % de la energía industrial en los países desarrollados (Đaković y cols., 2023). Históricamente, la operación de estos sistemas era manual, pero la progresiva integración de herramientas de control automático ha sido clave para optimizar procesos y garantizar la calidad de los productos.

■ ¿Qué es la deshidratación atmosférica y cómo funciona?

■ Es un proceso térmico que utiliza aire caliente en condiciones controladas para evaporar el agua. Es ampliamente utilizada en la industria alimentaria,

ya que es ideal para frutas, vegetales, carnes, hierbas, etcétera. Al mantener el alimento en un ambiente con una temperatura y flujo de aire constantes, se asegura la eliminación gradual de la humedad sin comprometer significativamente su estructura ni propiedades.

El proceso comienza con la colocación de los alimentos en bandejas dentro de una cámara de secado, donde un sistema de ventiladores hace circular aire caliente alrededor de los productos, los cuales absorben la humedad que se evapora, mientras que un sistema de escape elimina el aire saturado de agua, para permitir que el aire fresco continúe el ciclo.

Las variables en este proceso son:

- Temperatura: de entre 50 y 90 °C, dependiendo del alimento. Las temperaturas demasiado altas pueden degradar nutrientes sensibles como las vitaminas.
- Humedad relativa: el control de la humedad del aire ayuda a evitar el secado desigual.
- Velocidad del aire: un flujo de aire constante asegura una deshidratación uniforme.

En la **Figura 1** se muestra una deshidratadora industrial de alimentos por aire caliente.

■ La disciplina del control automático

■ Es una rama de la ingeniería que se encarga de diseñar y desarrollar sistemas que regulan automática-



Figura 1. Deshidratadora industrial de alimentos.

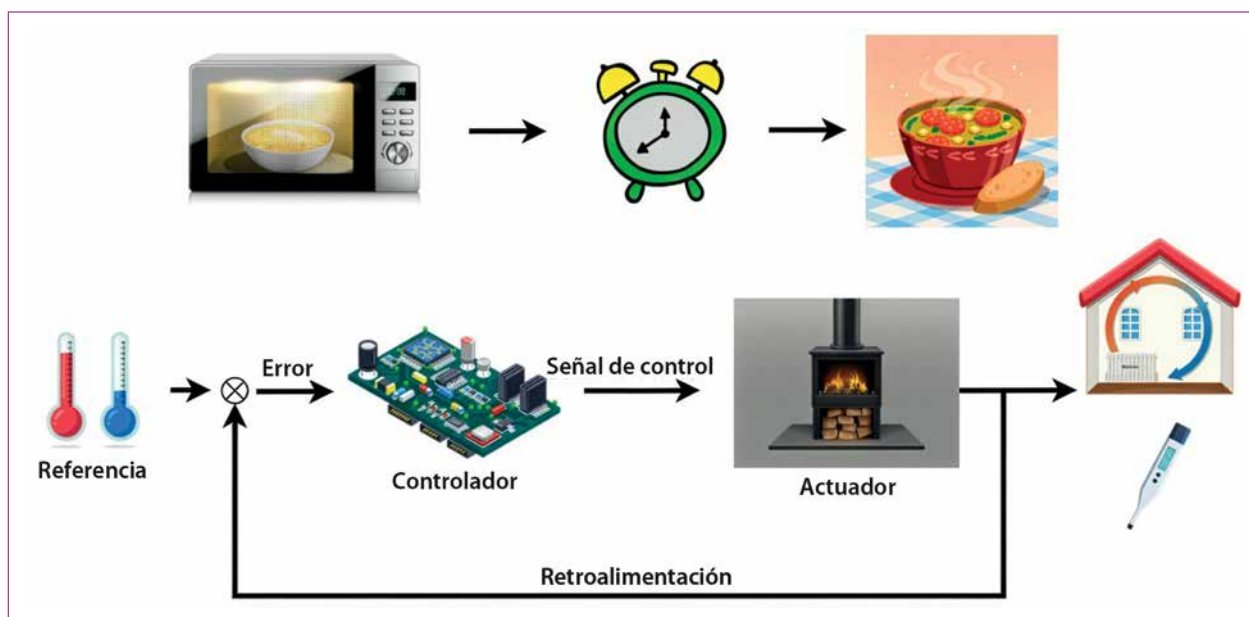


Figura 2. Sistema en lazo abierto y lazo cerrado.

mente el comportamiento de máquinas, procesos o dispositivos sin necesidad de intervención humana constante. Su objetivo es que éstos puedan ajustar su funcionamiento de manera autónoma para alcanzar y mantener un estado deseado, como una temperatura específica, una velocidad constante o una presión adecuada.

Los sistemas de control se basan en sensores (miden el estado actual del sistema), controladores (toman decisiones sobre qué hacer para corregir un error) y actuadores (realizan las acciones para cambiar el comportamiento del sistema). El control se usa en una gran variedad de aplicaciones, como en la industria, la robótica, los vehículos autónomos y en dispositivos electrónicos.

Dentro de la ingeniería de control, se utilizan los términos “sistema en lazo cerrado” y “sistema en lazo abierto” para referirse a un sistema donde existe, o no, la presencia de información de retroalimentación.

Un ejemplo de un sistema en lazo abierto es un microondas. Cuando se pone un plato de comida dentro y se selecciona el tiempo de cocción, el aparato calienta la comida y luego se apaga; no ajusta el tiempo de cocción ni la potencia en función de si la comida se ha calentado bien o no.

Un ejemplo de sistema en lazo cerrado es un sistema de calefacción. Si la temperatura medida por el termómetro (sensor) está por debajo de la temperatura deseada (referencia), el controlador ordena al calefactor (actuador) que se encienda. Cuando la temperatura alcanza el nivel deseado, el controlador apaga el calefactor. El sistema sigue ajustando la acción con base en las mediciones en tiempo real, lo que hace que el proceso sea automático y continuo. En la **Figura 2** se ilustran los sistemas mencionados.

Además, existen dos tipos de sistemas: los lineales y los no lineales. Los lineales son aquellos donde la salida es directamente proporcional a la entrada. En contraste, los no lineales son aquellos donde la salida no es proporcional a la entrada. Esto significa que, por ejemplo, si se duplica la entrada, no necesariamente se duplicará la salida, y que pequeñas variaciones en la entrada pueden causar grandes cambios en la salida.

De acuerdo con Aström y Hägglund (1995), el controlador más usado en la industria es el PID (proporcional integral derivativo), que funciona a través de tres componentes: el proporcional, que ajusta la respuesta en función de qué tan lejos está el valor medido del valor deseado; el integral, que corrige el error acumulado a lo largo del tiempo, y el derivativo,

que se anticipa a futuros errores basándose en la velocidad de cambio del error.

Los sistemas de control pueden ajustar en tiempo real los parámetros de deshidratación –como la velocidad del aire y la temperatura–, para optimizar el secado y mejorar la eficiencia energética. Gracias a esto, se logra una deshidratación uniforme minimizando pérdidas de nutrientes y asegurando la calidad del producto. Es en este sentido que investigadores y alumnos del programa de posgrado en Automatización y Control de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) trabajan para la generación de conocimiento dirigido particularmente al control de sistemas con retardo para la regulación de temperatura y optimización de energía, con enfoque en procesos de deshidratación de alimentos.

Un sistema con retardo es aquel en el que hay un tiempo de espera entre la acción realizada y la respuesta obtenida. Existen distintos tipos, como lo son los sistemas con retardo puntual, los sistemas con retardo distribuido y los sistemas de tipo neutral.

Para entender de una manera más clara los sistemas con retardo, veamos la **Figura 3**, donde se ejemplifica un sistema con retardo puntual. Imagina que te metes a la ducha y abres la llave del agua caliente. En este ejemplo, el retardo es el tiempo que transcurre entre abrir la llave y sentir el agua caliente.

A continuación, se presenta de forma cronológica el desarrollo del proyecto enfocado a la industria de la deshidratación de alimentos desarrollado en la UAEH, que ha derivado en artículos científicos que presentan diversas estrategias de control.

■ Revisión del camino recorrido por investigadores de la UAEH

A partir del 2008 dio comienzo el trabajo en un proyecto de investigación aplicado a la deshidratación. Comenzó con el desarrollo de un prototipo de máquina de secado donde se consideró la presencia de un retardo en la entrada, debido a la distancia existente entre el elemento calefactor de la máquina y el elemento a deshidratar, lo cual es un problema común en sistemas de transferencia de calor.

Para ilustrar lo mencionado, en la **Figura 4** se muestra un diagrama del sistema de secado, donde se observa que el prototipo consta de dos cámaras. En la primera, se coloca el alimento y se mide la temperatura; mientras que en la segunda es donde se encuentra el actuador, el cual aumenta su temperatura. Además, se observa un ventilador que genera un flujo de aire constante, el cual se calienta al pasar por la cámara del elemento calefactor para después incidir en la cámara del producto y de esa manera eliminar la humedad del alimento.

Como resultado del primer avance del proyecto, se demostró que gracias a la aplicación de controladores óptimos –en comparación con controladores convencionalmente usados en la industria del secado–, se obtiene una mayor eficiencia energética.

Entre los años 2010 y 2012, se presentó la continuación del proyecto en el cual, además de la aplicación de un controlador óptimo con compensación de retardo, se agregó la monitorización de color, mediante un colorímetro y un algoritmo para visión artificial. Además de conseguir una disminución del

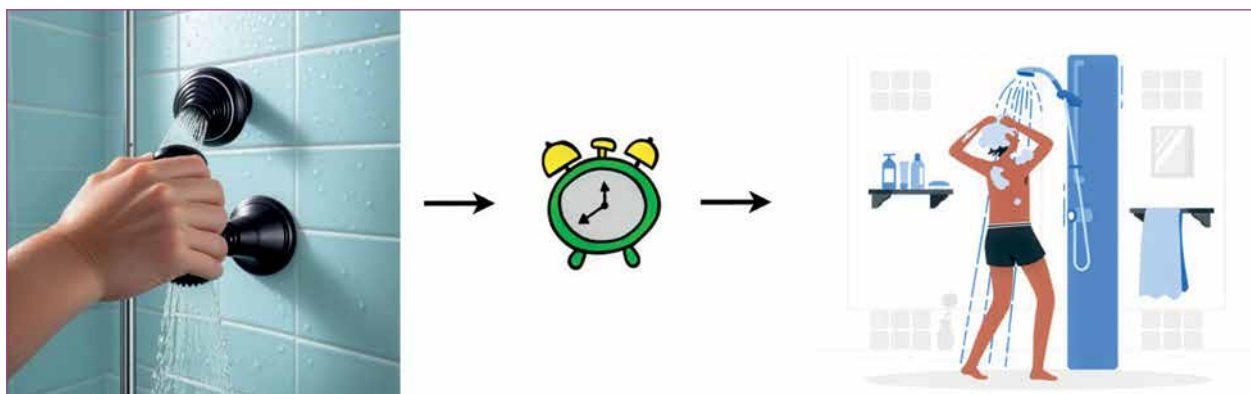


Figura 3. Ilustración de un sistema con retardo.

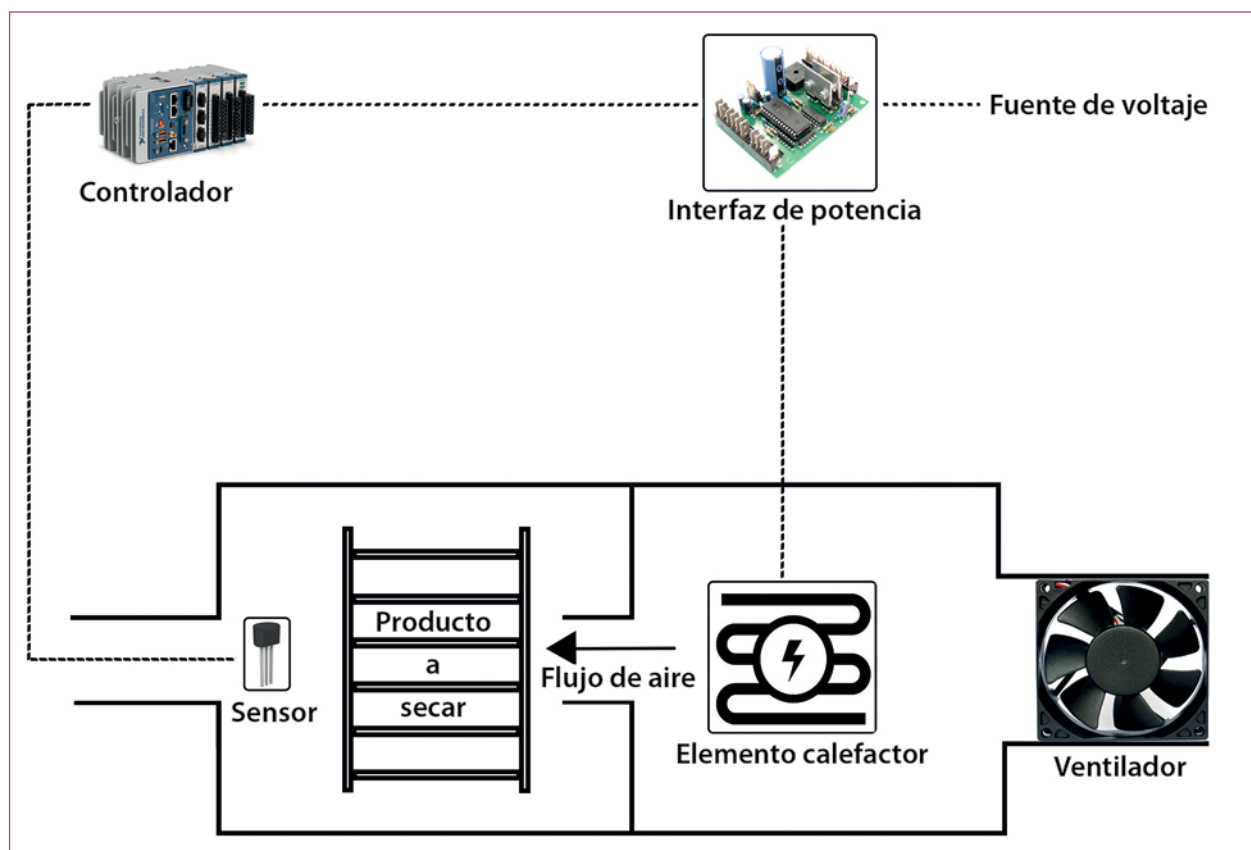


Figura 4. Diagrama esquemático de la máquina de deshidratación atmosférica.

consumo energético del proceso en un 30 %, se logró garantizar la calidad del producto deshidratado en cuanto a retención de nutrientes (Santos-Sánchez y cols., 2016). Asimismo, se trabajó en la implementación de distintas técnicas de control, tales como controladores difusos y robustos, y regulación de humedad.

Para el tercer avance, en 2016 se desarrolló un control adaptable no lineal, aplicado a deshidratación de plátano. Además del desarrollo de la estrategia de control para el secado, se realizó la implementación de un sistema fotovoltaico compuesto por paneles solares y baterías para la alimentación del proceso, que logró una reducción del consumo energético en 25 %. El sistema incorporó un método de identificación de los parámetros del proceso, lo que permitió realizar ajustes dinámicos en tiempo real optimizando la eficiencia térmica del proceso. Como parte de esta investigación, se utilizó un colorímetro para evaluar la pérdida de color del plátano deshi-

dratado, y así asegurar un producto final de mejor calidad.

Para el año 2017, la investigación avanzó hacia la optimización de controladores π (proporcional



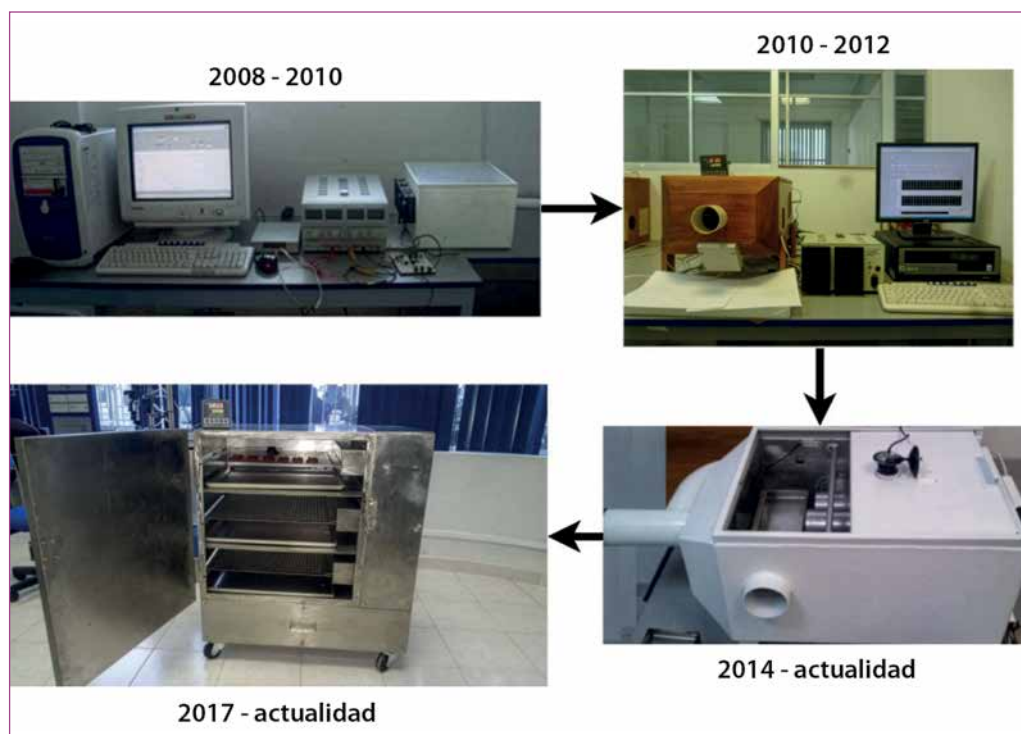


Figura 5. Evolución de las máquinas usadas por el grupo de investigación de la UAEH.

integral) y PID. En este estudio se utilizaron técnicas avanzadas de sintonización, como la regulación vía control integral y un algoritmo llamado Hill Climbing, con una reducción en el consumo de energía y una mayor estabilidad térmica. Asimismo, se implementó el sistema en un controlador que se puede aplicar en entornos industriales. En la **Figura 5** se muestra la evolución de las máquinas usadas por los estudiantes de la UAEH.

En 2018, se exploró la implementación de un control óptimo robusto para procesos con retardo en el estado, con base en la teoría de Lyapunov-Krasovskii –término que alude a dos matemáticos rusos conocidos por sus importantes contribuciones en el campo de la teoría de control y estabilidad de sistemas dinámicos–. Este avance permitió mejorar la estabilidad del proceso de deshidratación de jitomate reduciendo el impacto de perturbaciones externas y logrando una regulación térmica más precisa y eficiente (López-Labra y cols., 2019).

En 2019, el proyecto evolucionó hacia el desarrollo de estrategias de control predictivo. En esta fase, se diseñó un control basado en una técnica

llamada rediseño de Lyapunov. En este caso, se consideraron retardos tanto en el estado como en la entrada del control, y se logró una optimización en el desempeño del proceso térmico y mayor eficiencia en la regulación de temperatura (Santos-Sánchez y cols., 2020).

En el año 2022, se incorporó la teoría de control robusto no lineal, mediante el uso de la fórmula universal de Sontag –matemático estadounidense de origen argentino– y las **funcionales** de Lyapunov-Krasovskii. En esta etapa, se evaluó la resistencia del sistema ante perturbaciones y variaciones en la dinámica térmica, con el objetivo de garantizar un desempeño estable y eficiente en el proceso de deshidratación.

Conclusión

La disciplina del control automático ha permitido la transformación de la industria del secado al mejorar la eficiencia energética, la uniformidad del proceso y la calidad del producto. A través de la implementación de tecnologías como diseño y de-

Funcionales
Una funcional es como una máquina matemática que, en lugar de recibir un número y devolverte otro número, recibe una función completa y te devuelve un solo número como resultado.

sarrollo de controladores robustos, adaptativos y algoritmos predictivos, los investigadores y alumnos de la UAEH han logrado optimizar sistemas de secado al reducir costos. Como resultado de los trabajos antes mencionados, se han graduado 10 profesionistas del programa de posgrado. Actualmente el proyecto se encuentra enfocado en obtener harina de pescado de bajo coste y alto contenido nutricional para usarse como alimento animal, a partir de pez diablo, que es considerado una especie invasora.

Estos avances en control automático muestran cómo la tecnología y la ingeniería están revolucionando los procesos de conservación alimentaria.

Rodrigo E. Velasco Rebollo

Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

ve387696@uaeh.edu.mx

Omar Jacobo Santos Sánchez

Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

omarj@uaeh.edu.mx

Lilíam Rodríguez Guerrero

Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

lilíam_rodriguez@uaeh.edu.mx

Referencias específicas

Aström, K. J. y T. Häggglund (1995), *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, EUA, International Society of Automation.

Đaković, D., M. Kljajić, N. Milivojević, Đ. Doder y A. S. Anđelković (2023), "Review of energy-related machine learning applications in drying processes", *Energies*, 17(1):224. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en17010224>.

López-Labra, H. A., O. J. Santos-Sánchez, L. Rodríguez-Guerrero, J. P. Ordaz-Oliver y C. Cuvas-Castillo (2019), "Experimental results of optimal and robust control for uncertain linear time-delay systems", *Journal of Optimization Theory and Applications*, 181(3):1076-1089. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10957-018-01457-9>.

Santos-Sánchez, N. F., R. Salas-Coronado, O. J. Santos-Sánchez, H. Romero y E. Garrido-Aranda (2016), "On the effects of the temperature control at the performance of a dehydration process: energy optimization and nutrients retention", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86:3157-3171. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8481-z>.

Santos-Sánchez, O. J., R. E. Velasco-Rebollo, L. Rodríguez-Guerrero, J. P. Ordaz-Oliver y C. Cuvas-Castillo (2020), "Lyapunov redesign for input and state delays systems by using optimal predictive control and ultimate bound approaches: theory and experiments", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(12):12575-12583. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3040678>.