

# Sistema de entrenamiento para operadores de destilerías de etanol hidratado

Johanna Garcés-Cremé<sup>1</sup>, Ayanna Pérez-Espinosa<sup>1</sup>, Gil Cruz-Lemus<sup>1\*</sup>, Osney Pérez-Ones<sup>1</sup>, Gustavo Saura-Laria<sup>2</sup>, Arletis Cruz-Llerena<sup>2</sup>

1. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

Calle 114, No 11901 entre Ciclo Vía y Rotonda. La Habana, Cuba

2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)

Vía Banca, No.804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba

\* [gil@tesla.cujae.edu.cu](mailto:gil@tesla.cujae.edu.cu)

## RESUMEN

En el trabajo se presenta un sistema enmarcado en la rama de software educativo para entrenar a operadores de procesos tecnológicos en la industria alcoholera, este tiene como objetivo evaluar las decisiones que toman los operarios ante diferentes situaciones críticas y brindar al tecnólogo principal de un proceso, los resultados de la evaluación y superar las dificultades. Se realizaron varias corridas de pruebas en la etapa de entrenamiento, en las que se evaluaron los estados de 84 variables, 40 causas y 43 recomendaciones y se comprobó cuándo el sistema identificó la respuesta del usuario de forma correcta o incorrecta, coincidió con lo que aparece en los árboles de inferencia. Con la creación del sistema de entrenamiento se ahorraría al país 168 000 CUP, se mejoraría la preparación de los operadores y aumentaría la productividad en la industria.

**Palabras clave:** industria alcoholera, sistema de entrenamiento, procesos tecnológicos, motor de inferencia, sistemas expertos.

## ABSTRACT

The work presents a system framed in the branch of educational software to train operators of technological processes in the alcohol industry. Its objective is to evaluate the decisions made by operators in different critical situations and provide the main technologist of a process with the results of the evaluation and how they are being overcome. Several test runs were carried out in the training stage, in which the states of 84 variables, 40 causes and 43 recommendations were evaluated, and it was verified that when the system identified the user's response correctly or incorrectly, it coincided with what appears in inference trees. With the creation of the training system, 168 000 CUP would be saved, before buying one abroad, the preparation of the operators is improved, achieving an increase in productivity in the industry.

**Key words:** alcohol industry, training system, technological processes, inference engine, expert systems.

## INTRODUCCIÓN

La industria alcoholera de un país juega un rol sumamente importante dentro de la economía. En Cuba, esta industria se caracteriza por su trabajo ininterrumpido. Su personal, que cambia con frecuencia, no tiene suficientes especialistas para su capacitación. Debido a estas características, resulta casi imposible lograr un entrenamiento presencial de los operadores, lo que provoca que no todos posean el mismo nivel de conocimiento y, por ende, no todos puedan responder con rapidez y calidad cuando se presentan situaciones críticas en el proceso.

El grupo AZCUBA destaca en la producción de etanol hidratado a partir de derivados de la caña de azúcar. La capacitación del personal nuevo es responsabilidad del experto, ya que debe ser

entrenado de acuerdo a la actividad que desempeñará. La falta de preparación técnica de los trabajadores se profundiza al no contar con cursos tutoriales, ni planes de superación para los operarios; por tal motivo, se hace imprescindible acudir al especialista principal del área para tomar decisiones ante una situación crítica determinada, pero no siempre están presentes los expertos para ayudar.

La proliferación de nuevas y mejores tecnologías ha posibilitado que las industrias cubanas utilicen estrategias de automatización más sofisticadas, para controlar los procesos tecnológicos. Entre las variadas herramientas utilizadas para este fin se destacan, por su eficacia, los Sistemas expertos (SE). Los SE pueden ser considerados como un subconjunto de la inteligencia artificial, son una de las estrategias para el desarrollo de una mayor seguridad y rapidez en la toma de decisiones, en los procesos tecnológicos. El perfeccionamiento de los SE, con capacidad de respuesta en tiempo real, ha ampliado enormemente las posibilidades de su aplicación en el control de procesos industriales (1, 2).

En este trabajo se desarrolla un sistema de entrenamiento para los operadores de las etapas de fermentación alcohólica y destilación, del proceso de producción de alcohol etílico, para que respondan ante diferentes situaciones críticas y puedan no solo detectar las alteraciones en el proceso e informarlas, sino también capacitase (3).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Caracterización de los procesos de fermentación alcohólica y destilación de etanol hidratado**

En la etapa de fermentación, la miel final de la caña se descarga en una cisterna y, antes de ser almacenada en un tanque, se pasa primero por un filtro grueso y, luego, por un filtro más fino. Más tarde, se precalienta y se pasa a un disolutor, con el objetivo de mantener los °Brix de esta entre 15-16.

La miel diluida pasa a un tanque cultivador con agitación al que se le añade ácido nítrico para ajustar el pH a 5. En este comienza la fermentación, al adicionar el medio de cultivo que contiene los nutrientes se procede a la esterilización y se hace circular vapor a 0.05 MPa y 110 °C por la chaqueta. Se enfría la carga del cultivador hasta 30-32 °C y, a esta temperatura, se le introduce la levadura, se monitorea hasta dar por terminada esta fase de propagación, cuando el Brix ha alcanzado un valor entre 6-7. De aquí, pasa al prefermentador, el cual se llena con un flujo continuo de miel diluida, se le adicionan los nutrientes y el inóculo proveniente del cultivador y comienza el siguiente proceso de propagación de la levadura, se mantiene una temperatura entre 30 y 32 °C y se da por terminado cuando los °Brix disminuyan a valores entre 6 y 6.5.

La biomasa proveniente del prefermentador se somete a un proceso de fermentación que se incrementa en el fermentador, este proceso se considera terminado después que se han agotado completamente los azúcares fermentables, debe obtenerse un porcentaje de etanol en correspondencia con el sustrato adicionado y con los azúcares reductores fermentables.

El sistema de destilación de alcohol etílico hidratado se alimenta del tanque de vino proveniente del área de fermentación, el cual pasa por el primer condensador donde intercambia calor con la vinaza que proviene del fondo de la columna destiladora principal. El vino levurado pasa por una columna desgasificadora, para la eliminación de los gases y, luego, se introduce por el tope a la columna de destilación principal y se transforma ese vino en vinaza. Una vez que el etanol ha sido retirado del vino, este sale del tope de la columna destiladora a una concentración entre 45 y 55 % y se denomina a esta mezcla flema o mezcla hidroalcohólica.

Esta corriente de flema se envía a una segunda columna denominada rectificadora, en la que se concentra el etanol y se extraen, de platos intermedios, según su punto de ebullición, distintos componentes, lo cual es vital para la obtención del etanol dentro de las normas establecidas.

El vapor alcohólico que abandona el tope de la columna pasa por el precalentador que intercambia calor sensible con el vino fermentado, por lo que el alcohol se condensa parcialmente. De cada fracción condensada, antes de integrar el reflujo, existe la posibilidad de hacer una extracción de líquido, que es regulada, lo que permite controlar el grado alcohólico, su acidez, cantidad de ésteres, aldehídos y alcoholes superiores, con el objetivo de buscar la calidad adecuada en el producto final. Todas las extracciones se mezclan y pasan hacia un enfriador vertical de tubos y coraza que, posteriormente, van como producto final, hacia los tanques de almacenamiento.

Canfalonieri *et al.* (2) muestra las variables de control y sus intervalos normales de operación en la producción de alcohol etílico flema, aguardiente, alcohol etílico rectificado, alcohol etílico fino y alcohol etílico superfino. El estudio de los trabajos de Garcés (4) y Pérez (5) permitió conocer cuáles son las variables que se necesitan controlar y calcular en el proceso de producción de etanol hidratado. Para la etapa de fermentación se seleccionaron 29 variables y para la etapa de destilación 55. Estos indicadores solo deben ser utilizados como reglas para generar el sistema de base de conocimiento.

### **Similitudes entre los procesos de elaboración de queso fresco por vía enzimática, el de néctar de naranja-mandarina con el de los procesos fermentación alcohólica y destilación de etanol hidratado**

El sistema aplicado a este proceso parte del elaborado para procesos de la industria alimentaria, por lo que fue necesario evaluar las similitudes entre la fermentación alcohólica y destilación con los procesos precedentes. Los procesos de fermentación alcohólica y destilación cumplen con los requerimientos para aplicar el sistema con el fin de gestionar bases de conocimiento de la industria alimentaria. De igual manera ocurre con los procesos de elaboración de queso fresco por vía enzimática, el de néctar de naranja-mandarina con el de la etapa de destilación de etanol hidratado, utilizados para comprobar ambos sistemas, afirma Garcés (4).

En los procesos se controla el estado en que se encuentran cada una de las variables. El estado para las variables continuas está entre alto o bajo, para las variables discretas se considera positivo o negativo y para las válvulas entre abierta, normal o cerrada.

En la figura 1 se muestra el subárbol de la variable temperatura en el fermentador para el proceso de producción de etanol hidratado y aguardiente. En la figura 2 se muestra el subárbol de la variable temperatura del alcohol etílico flema.

Se muestran las variables con sus estados de alarma en las que, cada una tiene asociadas las causas y las recomendaciones. Garcés (4) y Pérez (5) presentan todos los árboles de inferencia correspondientes a los procesos de fermentación alcohólica y de destilación para la producción de etanol hidratado.

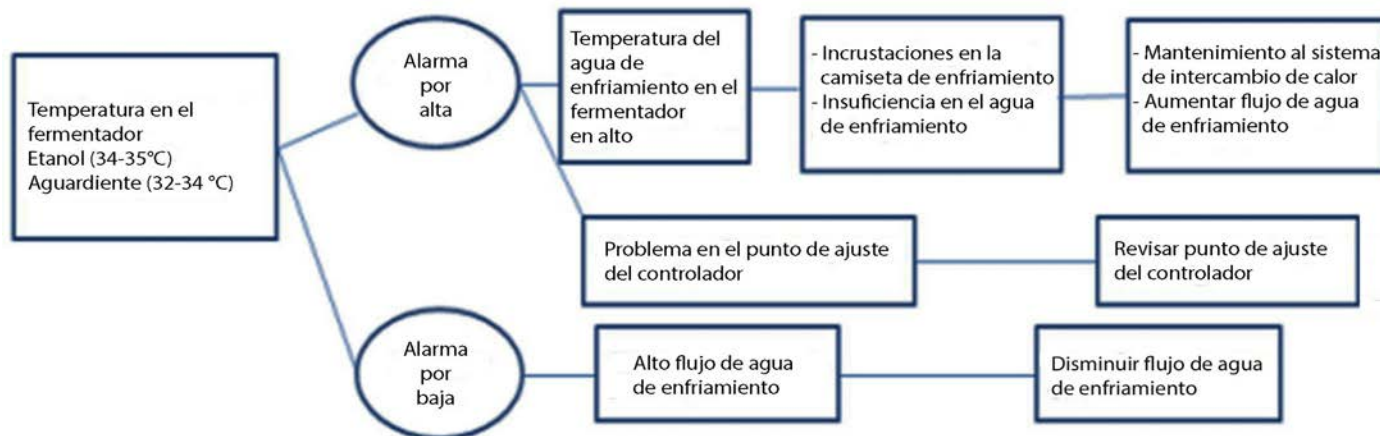


Figura 1. Subárbol de inferencia de la etapa de fermentación alcohólica.



Figura 2. Subárbol de inferencia del proceso de producción de alcohol etílico flema.

### Análisis de motores de regla

Existen varias opciones relacionadas con el software de desarrollo que posibilitan el entrenamiento de los operarios, como muestran Cruz (6) y Rodríguez (7). Se seleccionó un software libre distribuido según los términos de la licencia apache (7). Ofrece una ejecución de alto rendimiento y un sistema de administración de reglas de negocio, bien equipado para soportar la clasificación del negocio, a través de reglas, también incluye un complemento para usarse de forma integrada a Eclipse. El mecanismo de inferencia está basado en una versión mejorada del algoritmo ReteOO. Un archivo DRL (a menudo con la extensión. drl) lo describe Cruz (6).

### Análisis de las reglas obtenidas en las etapas de fermentación alcohólica y destilación de etanol hidratado

Se pueden deducir dos tipos de reglas:

1. El estado de la variable tiene asociado una serie de causas (Variable → Causa).
2. La causa tiene asociada sus recomendaciones (Causa → Recomendación).

Por ejemplo, a partir de la figura 2 se pueden obtener tres reglas:

1. Si la variable temperatura del alcohol etílico flema en estado bajo, implica la causa mala operación en la extracción de alcoholes.
2. Si la variable temperatura del alcohol etílico flema en estado alto, implica la causa mala operación en la extracción de alcoholes. (Variable → Causa).
3. Si hay mala operación en la extracción de alcoholes implica las recomendaciones, disminuir la extracción de alcoholes y verificar que la extracción se realice en el plato correcto. (Causa → Recomendación).

## **Informática educativa y tecnologías utilizadas en el sistema**

La Informática educativa es una disciplina que estudia el uso, los efectos y las consecuencias de las tecnologías de la información y el proceso educativo. Entre las diferentes ramas de la Informática educativa se pueden destacar las siguientes: Software educativo, Internet educativa y Robótica educativa.

El sistema elaborado está enmarcado en la rama de Software educativo, puesto que este puede tratar diferentes materias, de formas muy diversas, a partir de cuestionarios, para facilitar una información estructurada y ofrecer un entorno de trabajo más o menos rico en posibilidades de interacción.

## **Implementación del sistema para entrenar a operadores de procesos tecnológicos en la industria alimentaria**

Las funcionalidades por las que debe operar el experto, para llevar a cabo la realización de las bases de conocimientos, aparecen en el diagrama de casos de uso del sistema, que da a conocer Montoto (3).

El sistema de entrenamiento tiene como objetivo entrenar al operador de un proceso fuera de línea, sin la presencia de expertos y utiliza las reglas de producción como formalismo de producción y el Drools como motor de inferencia (8). Es el sistema encargado de interactuar con el usuario, que además de gestionar usuarios, procesos y áreas, interactúa también con las bases de conocimientos y el motor de inferencia, a la hora de verificar las respuestas dadas por el operario, al realizar el examen.

Este sistema de entrenamiento consta de tres usuarios: administrador, especialista y operario. Las tareas de cada uno son mostradas por Pérez (5) y en el caso del especialista se encarga de insertar las bases de conocimientos, configurar el entrenamiento y supervisar los resultados obtenidos de los operadores.

Cruz (6) plantea los requisitos de software y de hardware.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Pruebas funcionales**

Para este software, el nivel de prueba que se utiliza es: pruebas de sistema, que consisten en ejecutar el sistema completo, para buscar defectos, tanto en aspectos generales como en particulares. Se utilizan pruebas basadas en las funcionalidades y el método que se emplea es el de caja negra, el cual se lleva a cabo sobre la interfaz del software.

Se realizaron tres experimentos para los casos de pruebas de configuración de entrenamiento en cada caso que incluye el de insertar, modificar y eliminar. En los casos de prueba para el entrenamiento, en la etapa de las causas y para el entrenamiento en la etapa de las recomendaciones, se evaluaron cuatro entrenamientos en cada etapa, para cada tipo de pregunta en los diferentes procesos. Para afirmar que las respuestas son correctas, en estos últimos dos casos, se establece una comparación entre las respuestas dadas por el sistema y las respuestas que brinda el motor de reglas (JDrools) y, en todos los casos, coincidieron los resultados (3).

Posteriormente, se cargaron los ficheros del proceso y las reglas, generados por el sistema de base de conocimiento de cada proceso, en el sistema de entrenamiento, por el especialista, y se seleccionó la forma de evaluar al operario. Para la evaluación se utilizaron las cuatro preguntas que permite el sistema: verdadero o falso, completar los espacios en blanco, selección múltiple y enlazar. Los resultados fueron mostrados por Garcés (4) y Pérez (5).

Para comprobar la veracidad de los resultados que brinda el sistema de entrenamiento se realizaron varias corridas en cada etapa y, en cada de ellas se utilizaron los cuatro tipos de preguntas, lo que permite el sistema para ambos procesos. En el caso particular del proceso de etanol hidratado se realizó para los diferentes tipos de alcohol, como son: el aguardiente, alcohol etílico rectificado, alcohol etílico flema, alcohol etílico fino y alcohol etílico superfino.



**Figura 3.** Resultados de la evaluación del entrenamiento. (3A) primera etapa de selección de variables, (3B) segunda etapa de selección de causas y (3C) tercera etapa de selección de recomendaciones.

En las figuras 3A, 3B y 3C se muestran los resultados de la evaluación de las tres etapas. En la figura 4 se presenta la evaluación final del operador del proceso de destilación de etanol hidratado.



**Figura 4.** Notas de la evaluación del entrenamiento del operario del proceso de alcohol rectificado.

En todos los casos, el sistema fue capaz de identificar cuando el operador respondió de forma correcta o incorrecta en las tres etapas; el resultado coincide con lo que aparece en el árbol de inferencia de los procesos de la etapa de fermentación y de producción de etanol hidratado, según Garcés (4) y Pérez (5).

### **Análisis económico**

Se realizó un análisis comparativo del sistema de entrenamiento creado con el sistema de entrenamiento de simulación virtual de caldera industrial XK-BVST1 desarrollado por Shandong Xingke Intelligent Technologic Co. El sistema propuesto tiene un costo total de 72 000 CUP y el sistema chino tiene un costo total de 240 000 CUP (9), de acuerdo con lo planteado, la empresa se ahorraría 168 000 CUP con el sistema de entrenamiento presentado en este trabajo.

Con el empleo del programa se reduce, en un 50 %, el costo y el tiempo de entrenamiento. Se pueden concebir situaciones poco frecuentes y el operador puede prepararse para su resolución. El operario y el especialista pueden conocer, en todo momento, cómo marcha el proceso de capacitación. Se reducen considerablemente las interrupciones en los procesos, ya que los operarios alcanzan un mayor grado de capacitación para afrontar cualquier situación crítica.

### **CONCLUSIONES**

Se elaboró el sistema de entrenamiento para las etapas de fermentación alcohólica y destilación del proceso de producción de etanol, lo que permite entrenar a los operadores ante diferentes situaciones críticas. El sistema es capaz de detectar las alteraciones en el proceso y las informa; además, capacita a los operadores para conocer las causas de estas y proponer posibles acciones a realizar para retornar el proceso a la normalidad. Le brinda al operador los resultados de su evaluación, así como al tecnólogo principal de un proceso, los resultados de la evaluación y cómo se superan cada uno de los operarios. Las pruebas de funcionalidad realizadas al sistema demuestran que este funciona de manera adecuada ante las situaciones críticas analizadas.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Díaz-Casillas, L., Blanco, F. J., & Garijo, M. Sistema basado en reglas para la validación del despliegue de servicios. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 2010; 14(47), 54-70. <https://10.4114/ia.v14i47.1575>.
2. Confalonieri, R., Coba, L., Wagner, B., & Besold, T. A historical perspective of explainable Artificial Intelligence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2021; 11(1), e1391. <https://10.1002/widm.1391>.
3. Montoto Montané, Mónica. Sistema para el entrenamiento de operarios en la Industria Alimentaria Cubana [Trabajo de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba, 2022, 64.
4. Garcés Cremés, Johanna. Sistema de entrenamiento para operadores de destilerías del proceso de producción de etanol hidratado [Trabajo de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”; La Habana, Cuba, 2023, 194.
5. Pérez Espinosa, Ayanna. Sistema de entrenamiento para operadores de la etapa de fermentación del proceso de producción de alcohol etílico [Trabajo de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”; La Habana, Cuba, 2023, 72.

6. Cruz Lemus, Gil, Socorro Llanes Raisa, Rodríguez Riverón, Ana Mailen. Sistema para gestionar bases de conocimiento en la industria alimentaria. Revista Cubana de Ingeniería. 2018; IX(2) 60-68.
7. Rodríguez Riverón, Ana Mailen. Sistema para gestionar bases de conocimientos en la Industria Alimentaria [Trabajo de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”; La Habana, Cuba, 2017, 84.
8. Drools. Reference manual 2013. Available from: [http://docs.jboss.org/drools/release/6.1.0.Final/droolsdocs/html\\_single/index.html](http://docs.jboss.org/drools/release/6.1.0.Final/droolsdocs/html_single/index.html).
9. Alibaba.com. (1/5/2023). Retrieved from: [https://www.alibaba.com/product-detail/Boiler-simulator-Operationtraining-kit-XK\\_1009081726.htm](https://www.alibaba.com/product-detail/Boiler-simulator-Operationtraining-kit-XK_1009081726.htm).