Sistema de entrenamiento para operadores del proceso de generación de electricidad de un central azucarero

Amanda Luis-González[1], Gil Cruz-Lemus[1]*, José Luis Toca-Alonso[2]

1. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae)
Calle 114, No 11901, entre Ciclo Vía y Rotonda. Marianao. La Habana, Cuba
2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
Vía Banca, No. 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba
* gil@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

Introducción. Es preciso entrenar, de manera rápida y eficiente, a los operadores del proceso de generación de electricidad en la industria azucarera; pues este personal, en ocasiones, no tiene la capacitación necesaria o puede resultar inestable y esto influye, directamente, en la eficiencia del proceso; sin embargo, existe una limitada disponibilidad de planes de superación para los operarios e insuficientes especialistas para capacitarlos.

Objetivo. Desarrollar un sistema de entrenamiento para adiestrar a operadores del proceso de generación de electricidad en un central azucarero.

Conclusiones. Desarrollo de una herramienta que permita entrenar a los operadores en procesos tecnológicos y puedan enfrentar situaciones críticas. El sistema detecta alteraciones en el proceso e informa sobre ellas y capacita a los operadores para conocer sus causas y asesorar en las posibles soluciones. El sistema entrega resultados evaluativos tanto al operador como al tecnólogo y muestra el nivel de capacitación de cada uno de los operarios. Las pruebas de funcionalidad realizadas demuestran que el sistema opera eficazmente ante las situaciones críticas analizadas.

Palabras clave. Industria azucarera, sistemas de entrenamientos, generación de electricidad, bases de conocimientos.

ABSTRACT

Introduction. It is essential to train operators of the electricity generation process in the sugar industry quickly and efficiently. This personnel is sometimes inexpert or unstable, and this directly impacts the efficiency of the process. However, there is limited availability of training plans for operators and insufficient specialists to train them.

Objective. To develop a training system to train operators in the electricity generation process at a sugar mill.

Conclusions. Development of a tool that allows operators to train in technological processes and handle critical situations. The system detects and reports process disruptions, training operators to identify their causes and advise on possible solutions. The system provides evaluation results to both the operator and the technologist and shows the training level of each operator. Functional tests demonstrate that the system operates effectively in the critical situations analyzed.

Keywords. Sugar industry, training system, electricity generation, knowledge bases.

INTRODUCCIÓN

El potencial energético de la caña de azúcar y la eficiencia energética que poseen los centrales azucareros y refinerías, pertenecientes al grupo AZCUBA, actualmente, constituyen una potencialidad de inversión, plasmada en un programa de bioeléctricas; esto permite que, de toda la energía que se produce, se logre exportar un 15 % a la Unión Eléctrica Nacional (UNE).

En el proceso de generación de electricidad se trabaja de forma continua; sin embargo, el personal es muy inestable. La capacitación del personal nuevo es responsabilidad de un experto, pues se le debe entrenar de acuerdo con la actividad que desempeñará.

La falta de preparación técnica de los obreros constituye una preocupación, desde el punto de vista económico y de gestión de la empresa, pues este personal no tiene acceso a cursos tutoriales ni planes de superación, por lo que deben aprender sobre la marcha; por otra parte, no se cuenta con suficientes especialistas para la capacitación de los operadores, por todo ello, es imprescindible acudir al especialista principal de cada proceso para tomar decisiones, en caso de situaciones críticas, pero los expertos no siempre están presentes para determinar una posible solución.

En este trabajo se desarrolla un sistema de entrenamiento para adiestrar a operadores de procesos tecnológicos, en diferentes situaciones críticas que puedan ocurrir; además de proporcionar al tecnólogo principal del área, los resultados obtenidos, lo que le permite monitorear el nivel de capacitación de cada uno.

Caracterización de los procesos de tratamiento del agua, caldera y turbogeneradores

En el proceso de generación de electricidad de un central azucarero intervienen tres procesos, estos tienen parámetros que controlar, que resultan importantes para su eficiencia.

En el proceso de tratamiento del agua se prepara una disolución de agua con coagulante y otra de lechada de cal, en tanques mezcladores. Las disoluciones se transfieren a los tanques dosificadores desde donde, por gravedad, pasan hacia la canal mezcladora para su homogeneización. Posteriormente, a través de una válvula automática, se regula la mezcla que se le suministra al reactor, en el que ocurre la clarificación y descarbonatación del agua. Al salir del reactor, el agua pasa a un tanque clarificador abierto, donde se realiza la prueba de la varilla, para determinar si este fluido cumple con los requerimientos de laboratorio para avanzar a la etapa de filtración mecánica. Una vez iniciada esta última, cuando el filtro supera el tiempo de servicio, se efectúa el contralavado. La etapa final es el suavizamiento del agua en el filtro catiónico, de ahí el agua es bombeada a un tanque de reserva y, por último, se suministra a la caldera.

En el proceso de caldera, el aire es calentado en un precalentador con el objetivo de facilitar la combustión y, así, reducir el consumo de combustible. El agua es impulsada hacia la caldera mediante la bomba de alimentación que, a su vez, hace circular este fluido de forma forzada por el economizador. Cuando el agua entra al domo ocurre la separación líquido-vapor, se acumula el vapor en la parte superior de este y, de ahí, es extraído para ir a los sobrecalentadores. El bagazo es suministrado a la caldera al mismo tiempo que el agua y el aire. Los gases calientes son, entonces, succionados por los ventiladores de tiro inducido y/o por el tiro natural de una chimenea, estos comienzan un recorrido en el que calientan las superficies de los equipos con los que tienen contacto y les transfieren, de esa forma, su calor al agua, al vapor y al aire, en cada uno de los equipos correspondientes: el economizador, el calentador de aire y los sobrecalentadores. De estos últimos, sale el vapor generado que va hacia los turbogeneradores, en los que se expande progresivamente, a través de sus etapas e impulsa la rotación de los álabes conectados en el eje principal. En este proceso, la energía térmica y presión del fluido de vapor se convierten en energía mecánica, al girar este eje. El turbo está acoplado a un generador eléctrico que, mediante la inducción electromagnética, transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Posteriormente, el vapor, al disminuir su

presión y temperatura es conducido a un sistema de evaporadores, en el que el condensado puro se recircula hacia la caldera para ser reutilizado en el proceso de generación de vapor. La electricidad producida abastece la planta y, en algunos casos, se destina a la red externa.

Este estudio (1) permitió conocer cuáles son las variables que se necesitan controlar y calcular en el proceso de producción de electricidad de un central azucarero. Para el proceso de tratamiento del agua se seleccionaron 11 variables, para el proceso de caldera 15 variables; y, para el proceso de turbogeneradores, 15 variables. Estos indicadores solo deben ser utilizados como regla para generar los sistemas de bases de conocimientos.

Existen similitudes entre los procesos de elaboración de queso fresco, por vía enzimática y de néctar de naranja-mandarina, con el del proceso de generación de electricidad de un central azucarero.

El proceso de generación de electricidad cumple con las similitudes requeridas para aplicar el sistema y gestionar bases de conocimiento de la industria alimentaria. De igual manera ocurre con los procesos de elaboración de queso fresco por vía enzimática, y de néctar de naranja-mandarina, utilizados para comprobar ambos sistemas, según González (1).

En los procesos se controla el estado en que se encuentra cada una de las variables. El estado para las variables continuas se considera 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 variación de la composición química del agua del proceso de caldera, en la figura 2 se observa el subárbol de la variable densidad de la cal del proceso de tratamiento del agua y en la figura 3 se presenta el subárbol de la variable potencia reactiva del proceso de turbogeneradores. Se muestran las variables con sus estados de alarma, en la que cada una tiene asociadas las causas y las recomendaciones. Gonzalez (1) muestra todos los árboles de inferencia correspondientes al proceso de generación de electricidad.

Análisis de motores de regla

Existen varias opciones relacionadas con el *software* de desarrollo, que posibilitan el entrenamiento de los operarios como muestran Cruz (2) y Riverón (3). Se seleccionó un *software* libre distribuido, según los términos de la licencia apache (3). 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 e 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), que presenta Cruz (2).

Análisis de las reglas obtenidas en los procesos de tratamiento del agua, caldera y turbogeneradores

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).

A partir de la figura 3 se pueden obtener cuatro reglas,

1. Si la variable potencia reactiva en estado bajo implica la causa baja generación del reactivo.
2. Si la variable potencia reactiva en estado alto implica la causa alta generación en la de reactivo (Variable → Causa).
3. Si hay baja generación de reactivo implica las recomendaciones ajustar por el sistema de excitación del turbogenerador y revisar el cambio de tap y coordinar con el despacho.
4. Si existe alta generación de reactivo implica ajustar por el sistema de excitación del turbogenerador (Causa → Recomendación).

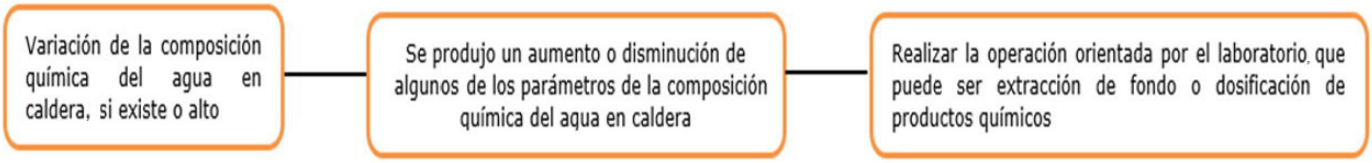

Figura 1. Subárbol de inferencia de la variable variación de la composición química del agua del proceso de caldera.

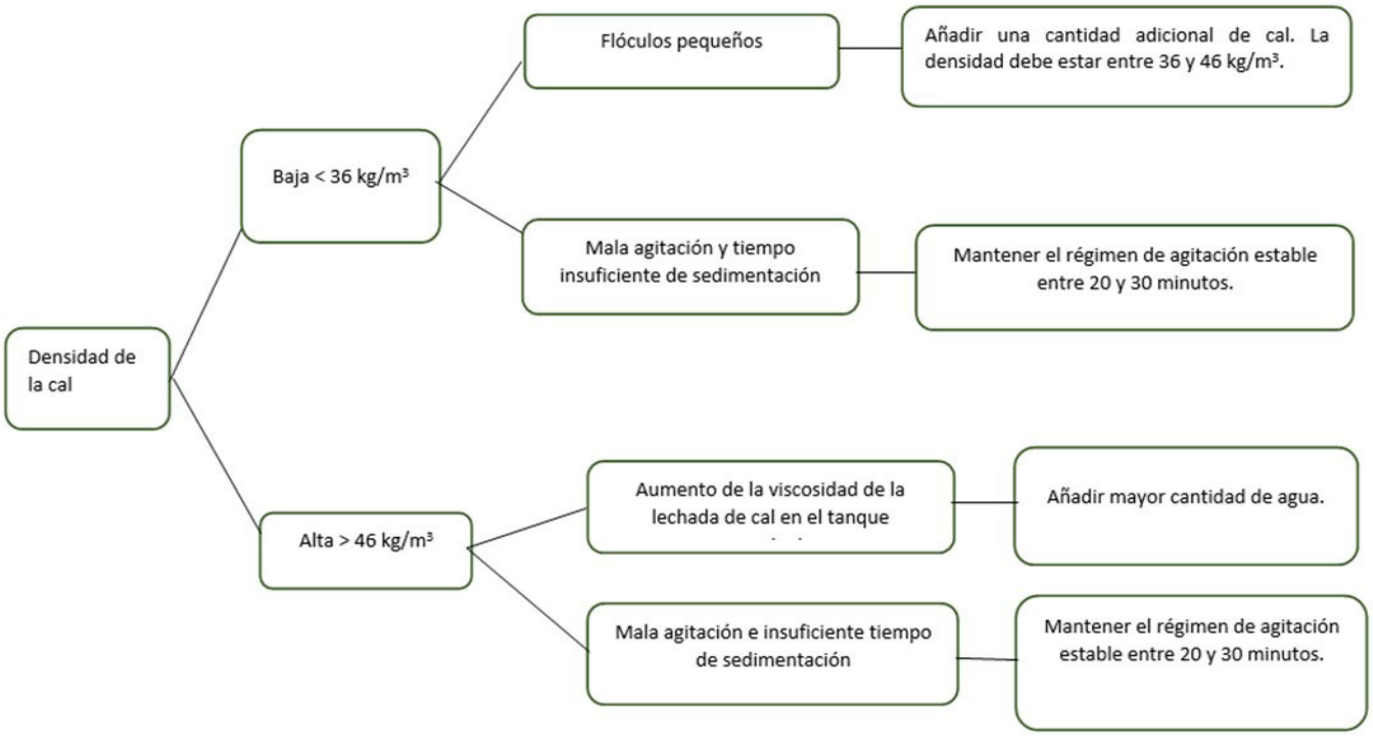

Figura 2. Subárbol de inferencia de la variable densidad de la cal del proceso de tratamiento del agua.

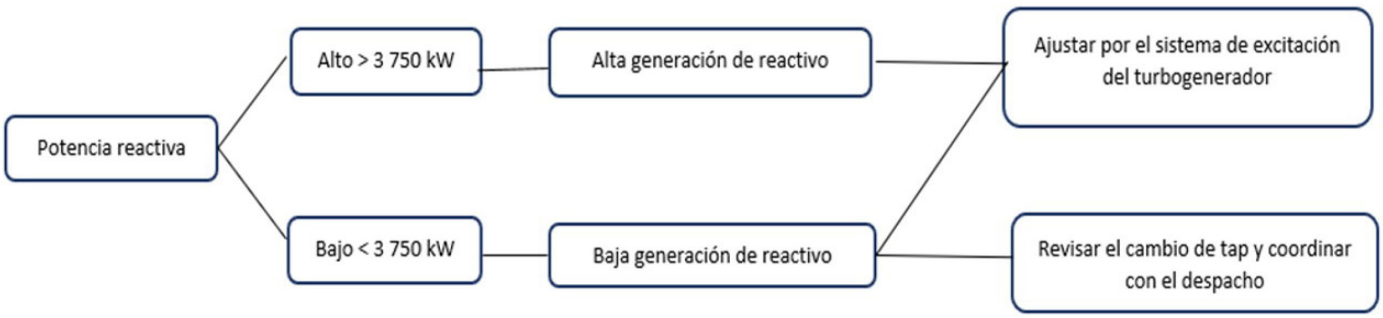

Figura 3. Subárbol de inferencia de la variable potencia reactiva del proceso de turbogeneradores.

Informática educativa y tecnologías utilizadas en el sistema

La Informática educativa es una disciplina que estudia el uso, efectos y 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, que facilitan una

información estructurada y ofrecen 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 muestra Montané (4).

El sistema de entrenamiento tiene como objetivo realizar el entrenamiento del operador de un proceso fuera de línea, sin la presencia de expertos y utilizar las reglas de producción como formalismo y el Drools como motor de inferencia (3, 5).

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 consta de tres usuarios: administrador, especialista y operario. Las tareas de cada uno las muestra González (1) y, en el caso del especialista, se encarga de insertar las bases de conocimientos, configurar el entrenamiento y supervisar los resultados obtenidos por los operadores, el propio autor expone los requisitos de software y de hardware y las pruebas funcionales (1).

Pruebas funcionales

Para este *software* se utiliza el nivel de prueba: pruebas de sistema, que consiste 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 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 preguntas, en los diferentes procesos. Para afirmar que las respuestas son correctas, en estos dos últimos casos, se estableció una comparación entre las respuestas dadas por el sistema y las respuestas que brindó el motor de reglas (JDrools) y en todos los casos coincidieron los resultados (5).

Posteriormente, se cargaron los ficheros de proceso y de reglas, generados por el sistema generador de bases de conocimientos de cada proceso en el sistema de entrenamiento, por el jefe de área y se seleccionó la forma en que desea evaluar al operario. Para la evaluación se utilizó el tipo de preguntas que permite el sistema para cada una de las etapas: selección de variables, completar los espacios en blanco, selección de recomendaciones, González muestra los resultados (1).

Para comprobar la veracidad de los resultados que brindó el sistema de entrenamiento se realizaron varias corridas, en cada etapa, para los procesos de tratamiento del agua, caldera y turbogeneradores.

A continuación se ilustran, en las figuras de la 4 a la 7, los resultados de la evaluación de las tres etapas y la evaluación final del operador, del proceso de tratamiento del agua.

Figura 4. Resultados de la evaluación del entrenamiento en la primera etapa de selección de variables.

Figura 5. Resultados de la evaluación del entrenamiento en la segunda etapa de selección de causas.

Figura 6. Resultados de la evaluación del entrenamiento en la tercera etapa de selección de recomendaciones.

Figura 7. Notas de la evaluación del entrenamiento del operario del proceso de tratamiento del agua.

En todos los casos el sistema fue capaz de identificar cuando el operador respondió de forma correcta o incorrecta en las tres etapas y coincidió el resultado con lo que aparece en el árbol de inferencia de los procesos de tratamiento del agua, caldera y turbogeneradores, según González (1).

CONCLUSIONES

1. Se desarrolló una herramienta que permite entrenar a los operadores de procesos tecnológicos para enfrentar diferentes situaciones críticas.
2. El sistema es capaz de detectar las alteraciones en el proceso e informar sobre ellas; además de capacitar a los operadores para conocer las causas de tales alteraciones y asesorar en las posibles soluciones para retornar a la normalidad.
3. El sistema entrega resultados evaluativos tanto al operador como al tecnólogo y muestra el nivel de capacitación de cada uno de los operarios. Las pruebas de funcionalidad realizadas demuestran que el sistema opera eficazmente ante las situaciones críticas analizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. González, A L. Sistema de entrenamiento para operadores del proceso de generación de electricidad de un central azucarero [Trabajo de diploma]. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE); 2025.
2. Cruz Lemus, S.L.R.; Rodríguez, A. M. Sistema para gestionar bases de conocimiento en la industria alimentaria. Revista Cubana de Ingeniería. 2018.
3. Riverón, A.M. Sistema para gestionar bases de conocimientos en la Industria Alimentaria [Trabajo de diploma]. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE); 2017.
4. Montané, M.M. Sistema para el entrenamiento de operarios en la Industria Alimentaria Cubana. [Trabajo de diploma]. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE); 2022.
5. Drools. Refence manual 2013 2013 [Available from: http://docs.jboss.org/drools/release/6.1.0.Final/droolsdocs/html_single/index.html.