Procedimiento para la optimización de mermas del proceso de añejamiento de rones

Beatriz García-Castellanos^{1*}; Osney Pérez-Ones²; Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas² e Idania Blanco-Carvajal¹

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)
Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba

2. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae
Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba

* beatriz.garcia@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

El proceso de añejamiento del ron experimenta mermas de volumen, denominadas mermas. Las variables de operación, registradas en bases de datos, contienen información valiosa para estudiar el proceso. De investigaciones anteriores se cuenta con un modelo de redes neuronales artificiales, para la predicción de mermas, en la etapa de añejamiento en bodegas, en función de las variables medidas, así como un modelo de regresión, ambos con alta significación estadística. En la presente investigación se propone un procedimiento para aunar ambos modelos y lograr la optimización del sistema con el empleo de algoritmos evolutivos, como método de optimización global de las funciones de costo. Tanto la implementación del procedimiento como su solución son objetivos de trabajos futuros. Se pretende, con los resultados de la minimización de la variable de interés, establecer un porcentaje máximo admisible de mermas en volumen, durante el proceso de añejamiento, para las ronerías del grupo empresarial AZCUBA.

Palabras clave: añejamiento de rones, mermas, Redes neuronales artificiales, algoritmos evolutivos, optimización.

ABSTRACT

The rum aging process experiences volume losses, called wastage. The operation variables, recorded in databases, contain valuable information to study the process behavior. From previous research, there is an artificial neural network model for the prediction of losses in the aging stage in cellars, based on the variables measured, as well as a regression model, both with high statistical significance. In the present investigation, a procedure is proposed to combine both models and achieve the optimization of the system using evolutionary algorithms as a method of global optimization of the cost functions. Both the implementation of the procedure and its solution are objectives of future work. It is intended, with the results of the minimization of the variable of interest, to establish a maximum admissible percentage of losses in volume during the aging process for the rum factories of the AZCUBA business group.

Key words: rum aging, volume losses, artificial neural networks, evolutionary algorithms, optimization.

INTRODUCCIÓN

El proceso tecnológico de producción del ron Añejo que se lleva a cabo en un área de producción de rones *Premium*, perteneciente al Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), comprende varias etapas (1). Durante el proceso de añejamiento del ron se producen mermas del producto. El añejamiento del ron no cambia ni transforma la bebida sino que desarrolla y sublima sus cualidades latentes. Es por ello que, en el contexto de excelencia en que

compiten estas bebidas, surge el interés por estudiar y minimizar la merma en el volumen del ron, durante su añejamiento, en relación con las condiciones ambientales existentes en la solera. En el mundo, el valor medio de mermas que se considera para toneles de 180 litros es del 10 % del volumen almacenado; sin embargo, la literatura señala para los países del Caribe un 13 % de mermas anuales (2), por ejemplo en Jamaica se reporta un 6 % de mermas (3). En un trabajo realizado en las soleras de la ronera de Cárdenas, entre los años 1985 y 1986, se corroboró una merma de 10.5 % anual. No se han encontrado reportes recientes del valor de estas mermas en Cuba.

La tecnología en las bodegas del ICIDCA permitió llevar a cabo un estudio del comportamiento de las mermas durante 13 meses de añejamiento; se realizaron mediciones del nivel del líquido de los toneles, grado alcohólico, temperatura y humedad. Toda esta memoria almacenada resultó útil en la comprensión del comportamiento del proceso, sus variables más importantes y la obtención de modelos para predecir el porcentaje de mermas en volumen, en el proceso de añejamiento del ron. Además, se evaluaron desde el punto de vista económico, las mermas correspondientes al período de estudio y resultaron superiores a las permitidas en normas internacionales. El conocimiento contenido y aplicado en estas técnicas de análisis de datos podría establecer una ruta para minimizar el porcentaje de mermas en el proceso de añejamiento del ron, por lo que se propone un procedimiento para optimizar las variables más influyentes en este proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

En investigaciones anteriores se empleó el software StatgraphicsCenturion XVII.2 para estudiar las posibilidades de modelar el proceso con el empleo de la regresión. Este modelo presentó valores de error cuadrático medio (ECM), R^2 y Cp de 0.115; 95.88 % y 3.32, respectivamente (4). Además, se utilizó el software MATLAB 2017 para estimar las mermas en volumen. En la modelación del proceso de añejamiento del ron se utilizó la Red neuronal perceptrón multicapa con dos capas ocultas, del tipo alimentación hacia adelante y propagación hacia atrás (feed-forward backprop). La topología seleccionada presenta la estructura 6-4-4-1, con un ECM de $2.1 \cdot 10^{-3}$ y un factor de correlación (R) con los datos experimentales de 0.998 (5).

En un primer acercamiento a la optimización de las condiciones medioambientales de la bodega, para un máximo admisible determinado se empleó el algoritmo de Búsqueda aleatoria e, igualmente, se realizó en el software MATLAB 2017. Para ello se fijaron variables del modelo neuronal y se generaron valores aleatorios de mermas. Se obtuvo un valor de mermas de 0.0065 litros para condiciones de temperatura y humedad relativa de 36.93 °C y 68.96 %, respectivamente. El resultado anterior no constituye un mínimo local de las variables respuesta, al no estar evaluado en toda el área que comprende la función (6).

La optimización estructural se realiza, usualmente, de modo determinista. Esta optimización consiste en minimizar la función de costo $J(X)$ sujeta a condiciones deterministas de igualdad (ecuación 1). Simbólicamente esto se expresa como:

$$\begin{aligned} &\text{minimizar } J(\vec{X}) \\ &\text{sujeto a } f_1(\vec{X}) < F_1; f_2(\vec{X}) < F_2 \end{aligned} \quad (\text{Ec.1})$$

En esta ecuación, X es el vector de las variables de diseño, las $f_i(X)$ son respuestas del sistema que dependen de estas variables y F_i son condiciones impuestas a estas respuestas (ecuación 2). Si se modelan estas incertidumbres y se hace uso de la teoría de probabilidades, esta optimización se convierte en:

$$\text{minimizar } J(\vec{X})$$

$$\text{sujeto a } P[f_1(\vec{X}) > F_1] \leq P_1; P[f_2(\vec{X}) > F_2] \leq P_2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde $P[A]$ es la probabilidad del evento aleatorio A y las P son máximos valores admisibles para las probabilidades de falla. Esta optimización estocástica de sistemas involucra, en consecuencia, los siguientes pasos:

- Definición probabilística de las variables que intervienen en el sistema.
- Representación del comportamiento del sistema, mediante el uso de un modelo matemático adecuado que incluya, a su vez, la evaluación de las condiciones del modelo.
- Encontrar la mejor configuración para este sistema, de tal modo que se minimicen las funciones objetivo, que representan los criterios a optimizar y se respeten las condiciones impuestas (7).

Los algoritmos evolutivos (AE) son algoritmos que transforman poblaciones de objetos numéricos individuales en nuevas poblaciones con operaciones inspiradas en la genética y la evolución de las especies (principios de la selección natural), tales como la regla darwiniana de sobrevivencia y reproducción de los más fuertes.

Los AE son un método de optimización muy robusto, eficiente y convergente. A dos principales características se les atribuye este hecho.

- Los AE tienen un patrón distintivo de búsqueda en el espacio objetivo: en vez de una búsqueda punto a punto, el conjunto de búsqueda se expande a un grupo en el cual un punto de búsqueda se mueve entre picos; por tanto, se incrementa la probabilidad de encontrar una solución cercana a la posición del óptimo global.
- El uso de funciones objetivo y de condiciones no requiere el uso de gradientes u otro conocimiento auxiliar. En consecuencia, la búsqueda con AE no está restringida a condiciones de continuidad, no linealidad o convexidad de la función objetivo o las condiciones (8).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el enfoque presente se utilizan las redes neuronales artificiales (RNA) para representar el comportamiento del sistema, se emplean como un sustituto en la evaluación del modelo numérico. Esto se combina con Algoritmos evolutivos (AE), como método de optimización global de las funciones de costo, al tener en cuenta las condiciones probabilísticas, debido a su versatilidad para trabajar con funciones implícitas, de manera que no se hace necesario conocer ni estimar su gradiente.

Para el procedimiento que se propone se siguieron los pasos en el diseño del AE:

- Selección del AE y ajuste de sus parámetros. Existen dos tipos principales de AE: las estrategias evolutivas (EE) y los Algoritmos genéticos (AG). De cada uno de ellos existen variantes y fusiones ideadas para mejorar su desempeño en problemas de optimización uni-multiobjetivo con condiciones y sin ellas.
- Determinación de los valores de las variables de diseño. Una vez definido el problema de optimización (variables de diseño, funciones objetivo a minimizar y condiciones), se procede a utilizar el AE seleccionado. Como primera medida, las variables de diseño adoptan unos valores iniciales (que pueden establecerse *a priori* o aleatoriamente), que son codificadas según las necesidades del algoritmo (codificación real o codificación binaria). Las variables de diseño son optimizadas simultáneamente para que todas las configuraciones encontradas sean idóneas, según el problema. Luego se codifican los nuevos individuos, valores de las variables resultantes de la primera optimización y se evalúa la aptitud de cada uno (la cual representa la adaptabilidad del individuo al medio), calculada sobre la base de la función objetivo y en la medida de violación de las condiciones. En el método propuesto se emplea la RNA seleccionada, como sustituto del modelo original para el cálculo de las condiciones probabilísticas.

Cada individuo es seleccionado según su aptitud en el medio de acuerdo con el algoritmo evolutivo utilizado. Se supone que los individuos con una aptitud alta tienen mayores posibilidades de reproducirse y pasar sus características a la siguiente generación. Así pues, se forma un banco de apareamiento que es una población intermedia, que será sujeta a combinación. De este banco se seleccionan, aleatoriamente, individuos que intercambian sus codificaciones según un patrón de combinación definido; de tal modo que se generan nuevas descendencias que, posteriormente, son sujetas a mutación. Los nuevos individuos están sujetos a mutación de algunos genes, con el objetivo de evitar la merma potencial de material genético de los procesos de selección y combinación, para prevenir el llamado desvío genético.

Una variante de los AE que mejora significativamente el desempeño del algoritmo es el elitismo, que consiste en que el mejor individuo entre padres e hijos pasa a la siguiente generación intacto, sin ser alterado por la mutación (7).

Una vez que se ha formado la nueva generación, esta se convierte en la nueva población de padres, a los cuales se les evaluará su aptitud y serán sometidos a las operaciones de selección, combinación y mutación nuevamente. Esto se hará hasta que cumpla algún criterio para finalizar la ejecución del algoritmo; por ejemplo, que se alcance el número máximo de generaciones o que, después de algún número definido de generaciones, no se haya alcanzado un nuevo éxito.

Se propone una simbiosis de los algoritmos evolutivos como técnica de minimización de la función de costo y las redes neuronales como método de cálculo de las probabilidades de falla, que constituyen las restricciones de las minimizaciones.

Caso de estudio

El enfoque del procedimiento anterior permite aplicar la optimización de las mermas en volumen de ron durante el proceso de añejamiento en bodegas. Las variables ambientales: temperatura y humedad relativa presentan el comportamiento aleatorio, que cumplen con una distribución normal.

Se empleará el modelo de regresión para la variable mermas que se muestra (ecuación 3); obtenido por García *et al.* (4), en función del mes numérico para el estudio, volumen medido y tiempo de añejamiento en cada tonel, que constituyen otras variables influyentes.

$$\text{Mermas} = -1.28 * \text{Mes numérico} - 0.18 * \text{Volumen} + 9.76 * \text{Tiempo de añejamiento} \quad (\text{Ec. 3})$$

De implementarse esta ruta, se prevén resultados significativos a corto plazo, se obtendrán valores locales o, en el mejor de los casos; globales, para un mínimo de mermas en función de los valores óptimos de las variables ambientales: temperatura y humedad. Estos resultados podrían influir en los cambios físicos y tecnológicos que habría que implementar en la bodega de añejamiento para cumplir con estos valores, así como su factibilidad económica, lo que permitiría oficializar las mermas admisibles para las roneras de AZCUBA.

CONCLUSIONES

- Se propone un procedimiento para lograr la optimización, de manera conjunta, de los modelos de redes neuronales artificiales y de regresión, representativos del proceso de añejamiento de rones para la variable mermas, con algoritmos evolutivos.
- La aplicación del procedimiento propuesto permitirá establecer un porcentaje máximo admisible de mermas en volumen de añejamiento de ron, para las roneras del Grupo Empresarial AZCUBA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Control de producción y trazabilidad, (2017).
2. Boscolo M, S LNB, W FD. Envelhecimento de aguardente de cana-de-açúcar em tonéis de madeira. *Engarrafador Moderno*. 1995, 6, 41, 30.
3. J. Marcano, (2019, Septiembre 15). El ron. Tradición en Las Antillas [Online]. Available: <https://mipais.j,marcano.com/economia/ron.html>.
4. García, B.; Pérez, O.; Zumalacárregui, L.; Blanco, I.; López, L.E. Análisis y modelación estadística del proceso de añejamiento de rones en una ronera cubana. *ITECKNE*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 91 -109. doi: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v17i2.2468>.
5. García, B.; Pérez, O.; Zumalacárregui, L.; Blanco, I.; López, L.E. Neural model for the prediction of volume losses in the aging process of rums. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2020, Vol. 29, No. 54, e10514.
6. García, B.; Pérez, O.; Zumalacárregui, L.; Blanco, I.; López, L.E. Uso de redes neuronales artificiales para la predicción de mermas en el proceso de añejamiento de rones. Memorias del Congreso Internacional sobre azúcar y derivados DIVER 2019, Hotel Nacional de Cuba, 24-28 de junio 2019.
7. Hurtado, J.; Álvarez, D. Optimización basada en confiabilidad por medio de redes neuronales y algoritmos evolutivos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería*, 2002, Vol. 18, No. 4, pp. 573-593.
8. G. C. S. Lee y Chin-Teng Lin, *Neural Fuzzy Systems*, Prentice Hal, EE.UU. (1996).