**ESTRATEGIA Y TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE NUEVOS PROCESOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS**

**Diseño de procesos agroindustriales considerando la incertidumbre, estabilidad y optimización de los parámetros de respuesta.**

***Design of agro-industrial processes considering uncertainty, stability and optimization of response parameters.***

**Dr.Cs. Erenio González Suarez1, MSc. Víctor Rodrigo Cerda Mejía2, Dr.C. Amaury Pérez Martínez2.** **Dra. C. Yailet Albernas Carvajal1**

1-Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. E-mail:erenio@uclv.edu.cu

2-Universidad Estatal Amazónica, Ecuador

**Resumen:**

* **Problemática:** Aunque la agroindustria alimentaria es uno de los sectores más potentes que contribuyen al cambio de la matriz productiva en la economía ecuatoriana, con posibilidad de incrementar este superávit añadiendo procesos de transformación, impulsando la innovación y desarrollo tecnológico en el sector, no están establecidos procedimientos que permitan el diseño eficiente de estas instalaciones
* **Objetivo(s):** Elaborar un procedimiento de diseño de instalaciones agroindustriales considerando la incertidumbre y la estabilidad y optimización de los parámetros de respuesta.
* **Metodología:** La investigación se realizó combinando experimentos a nivel de laboratorio, de control operacional y análisis de alternativas técnico económico, ajustándolos en un procedimiento de estrategia y de procesos.
* **Resultados y discusión:** Se obtuvo y valido mediante tres estudios de caso un procedimiento para el diseño óptimo de instalaciones de la agroindustria alimentaria conjugando factores de calidad, costos e impactos
* **Conclusiones:** El procedimiento propuesto permite considerar la incertidumbre y la optimización de los atributos de calidad para fijar los parámetros operacionales que sistemáticamente permiten definir los parámetros de diseño de equipos del proceso y evaluar los indicadores técnicos, económicos, ambientales.

**Palabras clave:** Agroalimentario, Calidad, Diseño, incertidumbre,

***Abstract:***

• **Problem**: Although the food agribusiness is one of the most powerful sectors that contribute to the change of the productive matrix in the Ecuadorian economy, with the possibility of increasing this surplus by adding transformation processes, promoting innovation and technological development in the sector, they are not established procedures that allow the efficient design of these facilities

• **Objective (s):** Prepare a design procedure for agroindustrial facilities considering the uncertainty and stability and optimization of the response parameters.

• **Methodology:** The research was carried out combining experiments at the laboratory level, operational control and analysis of technical and economic alternatives, adjusting them in a strategy and process procedure.

• **Results and discussion:** A procedure was obtained and validated through three case studies for the optimal design of food agroindustry facilities combining factors of quality, costs and impacts.

• **Conclusions:** The proposed procedure allows to consider the uncertainty and the optimization of the quality attributes to set the operational parameters that systematically allow to define the design parameters of the process equipment and evaluate the technical, economic and environmental indicators.

**Keywords:** Agrifood, Quality, Design, uncertainty

**1. Introducción**

Las microempresas y las pequeñas y medianas empresas ecuatorianas, especialmente en la agroindustria rural, son mayoritarias; lo que no significa que tienen el mayor porcentaje de participación en el mercado. Dentro de ellas, la agroindustria alimentaria se caracteriza por ser un sector capaz de contribuir al cambio de la matriz productiva con el propósito de satisfacer las necesidades siempre crecientes de la sociedad y además ser una importante fuente de empleo. Sin embargo, el uso de una tecnología poco eficiente y no adaptada a las condiciones locales, afectan el adecuado nivel y uniformidad en la calidad de los productos y la inocuidad de los mismos.

En este contexto se enmarca la investigación; en la cual desarrolla un procedimiento que considera la incertidumbre, la estabilidad y optimización de los parámetros de respuesta, utilizando indicadores técnicos económicos para garantizar la calidad de un producto agroindustrial desde la fase de diseño.

* 1. Gestión del conocimiento en la industria de procesos

Según (Concepción, González, López, & Ramos, 2021) la solución a los problemas que se presentan en la industria química para minimizar las incertidumbres en el desarrollo, diseño e intensificación de sus procesos, el diseño experimental constituye una poderosa herramienta para la toma de mejores decisiones. Además, (Cortés, Concepción Toledo, Ramos, López, & González-Suárez, 2021) consideran que la modelación es un elemento integrador por su función optimizadora en la actividad científica. Por tanto, según (González, Concepción, Pérez, Cerda, & Miño, 2021) las herramientas matemáticas disponibles y su combinación permiten alcanzar en el menor tiempo posible propuestas viables en el contexto de la industria de procesos químicos y fermentativos.

* 1. Diseño robusto de procesos

Según (Erişkin, Dolgun, & Köksal, 2021), el diseño de parámetros robustos es utilizado en muchas industrias para lograr una ventaja competitiva, se basa en encontrar los niveles de los parámetros de diseño con los cuales los parámetros de respuesta del producto son estables frente a fuentes de variación. Para ello el diseño estadístico y análisis de experimentos se utilizan para encontrar los niveles robustos de los parámetros de diseño cuando la variable respuesta es continua. Estos métodos se basan en la estimación de las características de calidad (o variable respuesta) media y varianza de un conjunto de parámetros de diseño utilizando datos recolectados a través del diseño experimental. Posteriormente, la búsqueda se enfoca en encontrar los niveles del parámetro de diseño que minimice la varianza y produce el valor de la respuesta óptima.

(Cerda et al., 2021), propone una estrategia para incrementar la aceptabilidad de atributos de calidad sensorial del jarabe de caña de azúcar mediante la simulación y disminución de la incertidumbre de parámetros operacionales. Para ello, se apoya en el desarrollo de un estudio de caso a través de una estrategia que contempla el análisis de los datos iniciales y efectúa cálculos a través del empleo de modelos matemáticos, la determinación del nivel Sigma de calidad y de la metodología de la GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). Con ello evidencia la importancia de la calidad en el diseño del producto y del proceso, dada su influencia en la aceptabilidad del producto y la factibilidad del proceso.

Sin embargo, la literatura se ve limitada en cuanto a un procedimiento para el diseño de procesos agroindustriales que basado en la estrategia de desarrollo de procesos parta de identificar los parámetros de respuesta y los parámetros operacionales que inciden sobre la estabilidad del producto, y que con el tratamiento de datos estudie el comportamiento del producto frente a variaciones de las condiciones de operación que permita definir la tecnología y analizar el proceso.

Por lo anterior, el objetivo de éste trabajo es proponer un procedimiento para el diseño de instalaciones agroindustriales bajo condiciones de incertidumbre que permita la estabilidad de los parámetros de respuesta.

**2. Metodología**

La estructura del procedimiento propuesta se presenta en la figura 1, y los pasos de su implementación son explicados a continuación.

El procedimiento consiste en: Identificación de los principales atributos de calidad del producto (parámetro de respuesta) y los parámetros operacionales (factores). Derivar la ecuación empírica con los datos obtenidos de acuerdo al diseño experimental propuesto. Identificar la distribución de probabilidad de los datos para inducir a una variación intencionada y comprender la relación entre la variable respuesta y los parámetros operacionales con el modelo obtenido. Cuantificación de productos no conformes. Con la guía para la medición de la incertidumbre (GUM) se reduce la incertidumbre de los parámetros operacionales hasta que el producto salga conforme (nivel sigma mayor a tres). Con estos parámetros operacionales se realizan el análisis, síntesis y evaluación del proceso.



Figura 1. Procedimiento para el diseño de proceso que considera la calidad desde la fase de diseño. fuente: elaboración propia.

El procedimiento propuesto se ejemplifica en el proceso de producción de miel de caña.

2.1 Diseño de experimentos. - Se utiliza los resultados reportados por (Quezada, González, Quezada, & Mera, 2016), plantea un diseño factorial 32, de dos factores con tres niveles tabla 1.

Tabla 1. Niveles de los parámetros operacionales y parámetros de respuesta

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Factor | Niveles | Parámetro de respuesta |
| Bajo | Medio | Alto | Viscosidad | Sabor | Presencia de cristales |
| X1 = pH | 3,5 | 4 | 4,5 | Por análisis sensorial |
| X2 = Concentración | 74 | 76 | 78 |

fuente: elaboración propia.

2.2 Selección de datos. – Los parámetros de respuesta en la agroindustria se agrupan en físico químicos, organolépticos, bromatológicos y microbiológicos, en general están asociados a un atributo de calidad del producto. Se utiliza los valores reportados por (Quezada et al., 2016)

2.3 Distribución de probabilidad. - Utilizando Arena v.7.0.1, se analiza la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los parámetros operacionales y parámetros de respuesta del ítem 2.1.

2.4 Generación de números aleatorios.- De acuerdo a (Cerda et al., 2021), para el análisis aleatorizado de acuerdo al modo de producción en la Amazonía Ecuatoriana corresponde a 1560 lotes que representa los lotes de producción de un año, por tanto se generan 1560 valores aleatorios con la distribución de probabilidad del ítem 2.3.

2.5 Selección del modelo. – La idea principal del procedimiento es la modelación como función de los parámetros de diseño y/o parámetros operacionales con los parámetros de respuesta a través de métodos de regresión u optimización de superficie de respuesta.

2.6 Simulación. – El o los modelos del ítem 2.5 se simulan para los valores del ítem 2.4 utilizando un asistente matemático.

2.7 Cuantificación de productos defectuosos. - Se contabiliza los valores obtenidos (parámetro de respuesta) del punto 2.6 que están dentro de los límites de la especificación o valor objetivo.

2.8 Determinación del nivel sigma. - El símbolo σ (sigma) es la desviación estándar del valor de la variable de calidad. Corresponde a cuantas desviaciones estándar caben entre los límites de especificación del proceso. Tiene como objetivo identificar y reducir la variación de la calidad del producto, e involucra una combinación de control estadístico de calidad y métodos de análisis de datos. El término seis sigma define un nivel objetivo de calidad: 3,4 defectos por millón de oportunidades (DPMP). Sin embargo, según (Cerda, Pérez, & González, 2020), algunas empresas aceptan sigma tres como estándar, significa que los productos entran dentro de especificaciones en el 93,32% de los casos (equivalente a casi 6 250 defectos por millón de oportunidades).

2.9 Determinación de la incertidumbre. - El ítem 2.8 es una toma de decisión, si el nivel sigma es menor a tres, entonces se determina el límite superior e inferior (incertidumbre combinada) de los parámetros operacionales que estabilizan el parámetro de respuesta.

El cálculo de la incertidumbre se realizó según el método empírico de la guía GUM, consiste en:

2.9.1 Especificación del mensurando

2.9.2 Identificación de las fuentes de incertidumbre

2.9.3 Determinación del modelo para el cálculo de incertidumbre combinada, se utiliza la ecuación (2):

 (2)

Donde: Y = incertidumbre combinada; U = incertidumbre expandida; Sub índice P = se refiere al factor que da Rmax; Rmax = valor máximo obtenido del parámetro de respuesta simulado.

2.9.4 Cálculo de incertidumbre, incertidumbre relativa e incertidumbre expandida, para ello se considera la estadística descriptiva de los datos simulados. Se asigna n=1560 y K=2 para un nivel de confianza de aproximadamente 95 %.

2.10 Producto. - Basado en la estrategia de desarrollo de procesos inicia con identificar los parámetros de respuesta y los parámetros operacionales que inciden sobre la estabilidad del producto. Hasta el ítem 2.9 se estudió el comportamiento de los atributos de calidad del producto frente a variaciones de los parámetros de diseño en función de los parámetros operacionales, y se seleccionan los que estabilizan y optimizan la calidad.

2.11 Selección de Tecnología. – Se seleccionan las operaciones unitarias necesarias que operan con los parámetros operacionales del ítem 2.10.

2.12 Definir esquema tecnológico. - Muestra la disposición de los equipos seleccionados para llevar a cabo el proceso; las conexiones de las corrientes; los caudales y composiciones de las corrientes y las condiciones de operación. Es un modelo diagramático del proceso. Para procesos en discontinuo se muestran las cantidades requeridas para producir cada lote.

2.13 Estimación de la capacidad. – Según (Cerda et al., 2020), se estima la capacidad de la planta a partir de la demanda del mercado y la disponibilidad de materias primas.

2.14 Macro localización. - El objetivo es determinar la ubicación del proceso de acuerdo a la disponibilidad de materias primas, la localización está condicionada por factores que pueden ser cuantificables en términos económicos.

2.15 Balance de masa y energía. – Se utiliza el límite de los parámetros operacionales del ítem 2.9. Los balances de materia son la base del diseño de procesos. Un balance de materia realizado para el proceso completo determinará las cantidades de materias primas requeridas y los productos producidos. Los balances en las unidades de procesos individuales determinan los caudales y las composiciones de las corrientes del proceso, y proporcionan las ecuaciones básicas para el dimensionado del equipo. En el diseño de procesos, los balances de energía se realizan para determinar los requisitos de energía del proceso.

2.16 Consumo menor que disponibilidad de materia prima. - Es una toma de decisión que permite re considerar el ítem 2.13.

2.17 Ambientalmente compatible. - Es una toma de decisión que permite evaluar si los caudales de vertimientos del ítem 2.15 son compatibles con el medioambiente, en su defecto permite re considerar el ítem 2.11.

2.18 Diseño de equipos y costos de adquisición. – Este ítem se refiere a la selección y “dimensiones” del equipo necesario para la función definida en el ítem 2.11. Y estimación del costo de adquisición.

2.19 Disponibilidad de los equipos. – Según (Sinnott & Towler, 2012), los equipos usados en las industrias de procesos químicos se pueden dividir en dos clases: con o sin marca registrada. El equipo con marca registrada, tales como bombas, compresores, filtros, centrifugadoras y secadoras, son diseñados y fabricados por empresas especializadas. Los equipos sin marca registrada se diseñan como elementos especiales y únicos para procesos particulares; por ejemplo, reactores, columnas de destilación e intercambiadores de calor.

2.20 Control de procesos. – El rango de los parámetros de respuesta (variables a controlar) y parámetros operacionales (variable manipulada) obtenidos en el ítem 2.9 juegan un importante papel en el diseño del sistema de control. Según (Pérez, Benítez, Oquendo, Julián, & Galindo, 2013), el objetivo de un sistema automático de control de procesos es ajustar las variables manipulables para mantener las variables controladas en el valor del punto de ajuste.

2.21 Análisis económico de inversión y producción. - El objetivo es realizar estimaciones preliminares de los costes de capital y de operación en las primeras etapas del diseño. La evaluación económica realiza estimaciones de coste aproximadas para decidir entre los proyectos alternativos y optimizar el diseño.

2.22 Optimización. - Un problema de optimación siempre se describe como la maximización o minimización de una cantidad llamada objetivo. Para los proyectos de diseño de ingeniería química, el objetivo sería una medida del grado de eficacia con el que el diseño cumple con las necesidades del cliente. Normalmente, será una medida del rendimiento económico, se incluye la estabilidad del parámetro de respuesta.

2.23 ¿Alternativa factible? - Es una toma de decisión, valora si la alternativa tecnológica es factible o no desde el punto de vista económico y de estabilidad del parámetro de respuesta, pero sin perder de vista que ya satisface el ítem 2.17.

2.24 ¿Existe otra tecnología? - Es una toma de decisión para la selección de la alternativa tecnológica viable desde el punto de vista técnico económico y de estabilidad del parámetro de respuesta.

2.25 ¿Existen nuevas capacidades? - Es una toma de decisión, el objetivo es analizar la existencia de nuevas capacidades para la alternativa tecnológica seleccionada en el ítem 2.24, siempre y cuando la capacidad seleccionada cumpla con la disponibilidad de materias primas.

2.26 Tecnología y capacidad óptima. - el objetivo es seleccionar la alternativa tecnológica óptima desde el punto de vista técnico-económico y de estabilidad del parámetro de respuesta.

**3. Resultados y discusión**

3.1 Diseño de experimentos. – El diseño factorial 32 de dos factores con tres niveles utilizado por (Quezada et al., 2016) no cubre el espacio factorial satisfactoriamente, ya que se necesita información sobre todo el dominio de factores para comprender el comportamiento del parámetro de respuesta frente a variaciones en el parámetro operacional y encontrar una región operativa óptima. Sin embargo, a partir de los resultados de los experimentos factoriales se determina la dirección a seguir.

3.2 Selección de datos. – Para caracterizar el proceso en la tabla 2 se muestra la estadística descriptiva de los datos.

Tabla 2 Estadística descriptiva de los datos

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | *pH* | *°Brix* | *Viscosidad* | *Sabor* | *Presencia de cristales* |
| Media | 4.01 | 76.04 | 5.50 | 6.90 | 6.89 |
| Desviación estándar | 0.37 | 1.45 | 3.24 | 2.93 | 2.69 |
| Varianza de la muestra | 0.14 | 2.10 | 10.47 | 8.60 | 7.25 |
| Rango | 1.20 | 4.97 | 9.92 | 9.87 | 10.00 |
| Mínimo | 3.40 | 73.52 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Máximo | 4.60 | 78.50 | 9.92 | 9.87 | 10.00 |

fuente: elaboración propia.

Se observa en la tabla la variabilidad de los parámetros respuesta (Viscosidad, Sabor, Presencia de cristales) de cero a 10 en la escala hedónica.

3.3 Distribución de probabilidad. – Se determina que la distribución de probabilidad Beta describe los datos de la tabla 2.

3.4 Generación de números aleatorios. – A partir de esta actividad las ecuaciones se escriben en scrips utilizando el software Octave. Con la distribución de probabilidad Beta se generan valores aleatorios (1560 lotes de producción/año) para los parámetros operacionales. En la primera iteración se representa las condiciones iniciales de acuerdo a la tabla 1 (pH de 3,5 a 4,5 y °Brix de 74 a 78)

3.5 Selección del modelo. – De la tabla 1 se decodificó los datos experimentales, utilizando la herramienta estadística RSM (*response surface methodology*) del software STATISTIC versión 8,0 se obtuvo los modelos empíricos de la tabla 3.

Tabla 3 Modelos empíricos de los parámetros de respuesta en función de los parámetros operacionales

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetros de respuesta** | **Modelos empíricos** |
| Viscosidad | -10806.86-37.56\*X1+0.33\*X12+287.14\*X2-1.90\*X22+0.45\*X1\*X2 |
| Sabor | 144.68+115.69\*X1-13.13\*X12-9.98\*X2+0.06\*X22-0.04\*X1\*X2 |
| Presencia de cristales | -4092.39+22.46\*X1-3.79\*X12+108.38\*X2-0.72\*X22+0.07\*X1\*X2 |

fuente: elaboración propia.

3.6 Simulación. – Los números aleatorios del punto 3.4 se sustituye en los modelos empíricos de la tabla 3 y se obtienen los parámetros de respuesta a diferentes condiciones de operación.

3.7 Cuantificación de productos defectuosos. – Se fijan los parámetros de respuesta objetivo (productos conforme de 6 a 10 en la escala hedónica; productos no conforme de 0 a menos de 6 en la escala hedónica) y se cuantifica los obtenidos en el ítem 3.6 que satisfacen esa condición. En la primera iteración el 31 % de los parámetros de respuesta están fuera de los límites de aceptación.

3.8 Determinación del nivel sigma. - En la primera iteración el nivel sigma es de 1,3. Se requirió al menos cuatro iteraciones para lograr menos del 6,68 % de productos defectuosos. Sin embargo, cuando se optimizan el VAN y los indicadores de calidad se tiene 0 % de productos no conformes.

3.9 Determinación de la incertidumbre. - El cálculo de la incertidumbre se realizó según el método empírico de la guía GUM. Los resultados se muestran en la tabla 4

Tabla 4. Determinación del intervalo de incertidumbre

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mensurando | Media | Desviación estándar o Incertidumbre absoluta (u) | Incertidumbre (m ) | Incertidumbre relativa (u rel) | Incertidumbre expandida (U) (K=2; 95 %) | Incertidumbre combinada (Y) | Límite Sup Y | Límite Inf Y |
| Viscosidad | 5,5 | 3,24 | 0,10 | 0,02 | 6,47 | 8,42 | 8,7 | 2,3 |
| Sabor | 6,9 | 2,93 | 0,09 | 0,01 | 5,86 | 10,32 | 9,8 | 4,0 |
| Presencia de cristales | 6,9 | 2,69 | 0,09 | 0,01 | 5,39 | 9,28 | 9,6 | 4,2 |
| pH | 4,0 | 0,37 | 0,01 | 0,00 | 0,74 | 1,15 | 4,22 | 3,76 |
| °Brix | 76,0 | 1,45 | 0,05 | 0,00 | 2,90 | 1,15 | 76,75 | 74,55 |

fuente: elaboración propia.

3.10 Producto. – La tabla 4 muestra los límites superior e inferior de los parámetros operacionales pH de 3,76-4,22 y °Brix de 76,75-74,55 para que los parámetros de respuesta del producto se estabilicen (de 6 a 10 en la escala hedónica).

3.11 Selección de Tecnología. – La variante tecnológica seleccionada para el diseño de una planta de producción artesanal de miel de caña en condiciones de la Amazonía es la discontinua donde el tipo de proceso es de operaciones por lotes. Se basa en el empleo de intercambiadores de calor para la evaporación y concentración del jugo de caña hasta la concentración definida en el ítem 3.9.

3.12 Definir esquema tecnológico. –La tecnología se lleva a cabo siguiendo un proceso de evaporación por etapas, se representa en un diagrama de bloque en la Figura 2.



Figura 2 Esquema tecnológico para producción de miel de caña. fuente: elaboración propia.

3.13 Estimación de la capacidad. – Se realizó en función de la disponibilidad de materia prima debido que la demanda del producto es mucho mayor que la capacidad de producción. Se decidió fijar una capacidad productiva de 1183,75 kg/lote de caña de azúcar que es el promedio observado en las fábricas de la localidad en condiciones artesanales.

3.14 Macro localización. - Se tomó en cuenta la disponibilidad de materias primas y las disponibilidades de tecnologías para empresas tipo artesanal de empresas que están ubicadas en la provincia de Pastaza en la parroquia Tarqui.

3.15 Balance de masa y energía. – La composición de todas las corrientes que intervienen en el proceso se calculan con el software GNU Octave. Los valores de ceniza en el jugo de caña (0,02 %), contenido de sólidos solubles del jugo de caña que sale del filtro (18 %), metros sobre el nivel del mar (900), pérdida de calor asumida (0,9 %) y de la tabla 3.1 son mediciones experimentales en la fábrica “El Valle” ubicada en Pastaza Ecuador. El calor específico del vapor (2,1 kJ/kg K), coeficiente global de trasferencia de calor (285,7 W/m2 K) se tomó de Espitia, y col., (2020).

En particular se utilizó las ecuaciones (4) y (5) que correlacionan los sólidos solubles (°Brix) para la determinación del calor específico (Cp) y la variación de temperatura del punto de ebullición (ΔTB) del jugo de caña.

 (4)

 (5)

La cantidad de caña 1183,75 kg, bagazo 355,12 kg y bagacillo 57,09 kg es constante en todas las simulaciones debido que las condiciones de entrada de las materias primas se mantienen constantes en todos los estudios de caso. La cantidad de miel producida para el caso que se optimiza la calidad es 183,65 kg y cuando se optimiza el VAN es variable entre 183,47 kg a 183,56 kg.

El consumo de energía para el caso que se optimiza la calidad es 1663,47 kJ/kg de producto, este es menor que cuando se optimiza el VAN.

3.16 Consumo menor que disponibilidad de materia prima. – De acuerdo a (INEC- ESPAC, 2020), la superficie plantada de caña de azúcar en Ecuador para ser destinada a la producción de derivados de la caña (miel de caña, alcohol artesanal, azúcar no centrífuga) es de 17 870 hectáreas. Considerando la productividad de la caña de azúcar de 78 toneladas por hectárea, se determina que el consumo es menor a la disponibilidad de caña.

3.17 Ambientalmente compatible. - El vertimiento de residuos sólidos es 2,25 kg bagazo, bagacillo/kg miel para cuando se optimiza el VAN, y de 2,24 kg bagazo, bagacillo/kg miel para cuando se optimiza la calidad desde la fase de diseño. Por tanto, el procedimiento es factible desde el punto de vista ambiental.

3.18 Diseño de equipos y costos de adquisición. – El área de transferencia de calor en el evaporador 3 cuando se optimiza la calidad es de 1,0033 m2, cuando se optimiza el VAN es variable en un intervalo de 1,0052 m2 a 1,0071 m2 en razón que hay variación en el rango operacional, mientras que cuando se busca el rango operacional óptimo, el área fluctúa entre 0,98 m2 a 0,9853 m2.

El costo de adquisición se determinará a través de un ajuste de escala y actualización de su costo según lo propuesto por Peters y col. (2003). En este trabajo el costo de adquisición de los equipos equivale a 90 $/kg producto obtenido, según lo propuesto por PRODAR-FAO, (1992). Se utilizó ésta referencia debido que la capacidad de la planta se adapta a las condiciones de la amazonía ecuatoriana. El índice de actualización de costos para el año 1992 es de 358,2 y para el año 2019 es de 562.1 según la proyección con los datos de Vatavuk, (2002).

3.19 Disponibilidad de los equipos. – Para esta tecnología artesanal en cada etapa de evaporación se utiliza un evaporador discontinuo abierto a la atmósfera de construcción nacional en acero inoxidable.

3.20 Control de procesos. – La variable a controlar son la concentración (°Brix), y pH. Se implementó un sistema local de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos mediante una tarjeta microcontrolada de código abierto. Para registrar continuamente las variables del proceso de producción de la miel de caña se utilizó cinco sensores de temperatura (la ecuación 5 correlaciona la variación temperatura con los °Brix), un sensor de pH y un sensor de nivel de líquido en los evaporadores. Mediante el análisis matemático de los datos obtenidos en el proceso de evaporación proporcionado por el sistema de adquisición y monitoreo de datos procesado por la herramienta GNU Octave, se obtuvo la función de transferencia de esta etapa (tabla 4).

Tabla 4 Función de transferencia

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Etapa del proceso | Modelo | Tipo de controlador | Parámetros ajustables |
| KP | τI | τD |
| Clarificación |  | PI | 0,037 | 0,00035 |  |
| Evaporación |  | PID | 28,3 | 0,067 | 2980 |

fuente: elaboración propia.

3.21 Análisis económico de inversión y producción. - Los valores utilizados para determinar los costos de operación corresponden a los observados en la fábrica “El Valle”, número de operarios por lote 5, número de turnos por trabajador 1, número de lotes por día 10, días de trabajo al año 156, costo de operarios por hora 2 USD, costo de facilidades auxiliares 0,002 $/kg, precio de etiquetas 0,05 USD/unidad, precio envase 0,5 $/unidad, precio de la caña 0,09 $/kg, estos parámetros se utilizaron para determinar los costos variables. En la tabla 5, se observa que el VAN está en dependencia del rango operacional. Sin embargo, se obtiene un VAN mayor cuando se optimiza la calidad, respecto a cuando se optimiza el VAN, esto en la medida que el número de productos defectuosos es menor, debido a que aumentan los ingresos por ventas, mientras que los costos de inversión y producción no varían para cada uno de los estudios de caso. Cuando los valores de los atributos de calidad se acercan más al valor de 10 se obtienen mayores ingresos y mayor cantidad de producto.

Tabla 5 Evaluación económica

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *Parámetros* | *Rango operacional* | *Minimiza Varianza* | *Maximiza VAN* |
| *Mínimo* | *Máximo* |
| VAN (USD) | 2 603 469,38 | 6 669 971,27 | 6 629 901,20 | 6 616 453,30 |
| Costo de inversión (USD) | 126 908,52 | 127 081,68 | 126 318,08 | 126 203,77 |
| Costo de producción (USD) | 828 019,44 | 829 146,61 | 824 176,13 | 823 661,52 |
| Costo adquisición de equipos (USD) | 26 059,24 | 26 094,80 | 25 938,00 | 25 914,53 |

fuente: elaboración propia.

3.22 Optimización. - Para la construcción del modelo, se tomó como referencia lo planteado por Hadiyanto y col. (2009), se incluyeron los indicadores de calidad, donde el objetivo era minimizar la de los indicadores de calidad (C) determinados en la primera etapa del procedimiento propuesto. El propósito fue encontrar el vector óptimo que minimice C ecuación (6).

 *(6)*

El peso del factor (w) se asigna según la importancia de los indicadores de calidad, de tal manera que. En este trabajo, V, S y C se consideran de igual importancia debido que es resultado de la evaluación sensorial. Por tanto, se asigna un peso de 1/3 para cada indicador de calidad.

El pH (X1) y °Brix (X2), se consideran variables de decisión del problema de optimización. La FO que se evalúa para minimizar la de los indicadores de calidad ecuación (7):

 *(7)*

Para maximizar el VAN se utilizó la ecuación (8)

 *.8)*

Se observa en la tabla 5 el valor más alto del VAN cuando se optimizó la calidad, fue de 6629901,20 USD; mientras que cuando se optimizó el VAN, el valor fue de 6616453,31 USD.

3.23 Tecnología y capacidad óptima. – En la tabla 6 se muestran las condiciones de operación inicial y los propuestos con la respectiva cuantificación del nivel sigma. Se observa que hay una disminución significativa en los productos no conformes y una estabilidad del parámetro de respuesta dentro de las especificaciones predefinidas (figura 3).



Figura 3 Parámetros de respuesta. fuente: elaboración propia.

Tabla 6 Condiciones de operación inicial y los propuestos

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Parámetros operacionales** | **Primera Iteración** | **Nivel sigma** | **Tercera Iteración** | **Nivel sigma** |
| pH | 3,5 – 4,5 | 1,3 | 3,76 – 4,22 | Mayor a tres |
| Concentración (°Brix)  | 74 - 78 | 74,55 – 76,75 |

fuente: elaboración propia.

**4. Conclusiones**

1. El diseño de la instalación para la producción de miel de caña (producto alimenticio), demostró que existe influencia entre los parámetros de respuesta (viscosidad, sabor, presencia de cristales) y los parámetros operacionales (concentración y pH) y de diseño (área de transferencia de calor).
2. El procedimiento propuesto permite considerar la incertidumbre, estabilidad y optimización de los parámetros de respuesta (viscosidad, sabor, presencia de cristales), en el caso de la miel de caña; para fijar los parámetros operacionales (pH, °Brix) que sistemáticamente permiten dimensionar los equipos del proceso (evaporadores discontinuos abiertos a la atmósfera) y evaluar los indicadores dinámicos.

**5. Referencias bibliográficas**

Cerda, V., Pérez, A., & González, E. (2020). Procedimiento para el diseño óptimo de procesos considerando la calidad: aplicación en la elaboración de miel de caña. *Centro Azúcar*, *47*(3), 103–113. Retrieved from http://centroazucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2020/4/10 Vol. 47 No.4 2020.pdf

Cerda, V., Pérez, A., Guardado, E., Cerda, G., Diéguez, K., Benítez, I., & González, E. (2021). Simulation strategy to reduce quality uncertainty in the sugar cane honey process design. *Ingeniería e Investigación*, *41*(1), 1–11. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n1.81484

Concepción, D., González, E., López, E., & Ramos, F. (2021). Gestión del conocimiento en la proyección científica de la industria química mediante diseños experimentales. *UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD | Revista Científica de La Universidad de Cienfuegos*, *13*(2), 446–451. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202021000200446&script=sci\_arttext&tlng=en

Cortés, R., Concepción Toledo, D., Ramos, F., López, E., & González-Suárez, E. (2021). Los métodos de investigación científica y la interdisciplinariedad en la intensificación industrial: impacto económico y social. *UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD | Revista Científica de La Universidad de Cienfuegos*, *13*(3), 110–117. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202021000300110&script=sci\_arttext&tlng=en

Erişkin, L., Dolgun, L. E., & Köksal, G. (2021). A method for robust design of products or processes with categorical response. *Quality Engineering*, *33*(3), 1–13. https://doi.org/10.1080/08982112.2021.1896732

Espitia, J., Velásquez, F., López, R., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2020). An engineering approach to design a non-centrifugal cane sugar production module: A heat transfer study to improve the energy use. *Journal of Food Engineering*, *274*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109843

González, E., Concepción, D., Pérez, A., Cerda, V., & Miño, J. (2021). *Gestión del conocimiento en la industria de procesos con apoyo de herramientas matemáticas* (Edición 1). Santa Clara, Cuba: Editorial Samuel Feijóo.

Hadiyanto, Boom, R. M., van Straten, G., van Boxtel, A. J. B., & Esveld, D. C. (2009). Multi-objective optimization to improve the product range of baking systems. *Journal of Food Process Engineering*, *32*(5), 709–729. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00240.x

INEC- ESPAC. (2020). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Retrieved June 12, 2020, from https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/

Pérez, A., Benítez, I., Oquendo, H., Julián, M., & Galindo, P. (2013). Integración del diseño del sistema de control automático al diseño total de una planta para obtención de alimento animal a partir de residuos de la industria azucarera. *ICIDCA : Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, *47*(2), 42–51. Retrieved from https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2231/223128548007

Peters, M. S., Timmerhaus, K., & West, R. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (Fifth). New York: McGraw Hill.

PRODAR-FAO. (1992). Equipos de procesamiento de alimentos. Fichas técnicas. Retrieved March 19, 2020, from http://www.fao.org/fileadmin/templates/inpho/documents/EQUIPOS.pdf

Quezada, W., González, E., Quezada, W. D., & Mera, M. (2016). Cane Honey : Process , Quality and Harmlessness. *International Journal of Engineering Research*, *5*(7), 589–593. https://doi.org/10.17950/ijer/v5s7/709

Sinnott, R., & Towler, G. (2012). *Diseño en Ingeniería Química* (Quinta). Barcelona: Editorial Reverté.

Vatavuk, W. (2002). Updating the CE Plant Cost Index. *Chemical Engineering*, *109*, 62–70. Retrieved from https://www.chemengonline.com/Assets/File/CEPCI\_2002.pdf