

Artículo Original

**OPTIMIZACIÓN DE LA FIABILIDAD DEL EQUIPAMIENTO EN UN
CENTRAL AZUCARERO Y PLANTA DE ETANOL**

**OPTIMIZING EQUIPMENT RELIABILITY IN A SUGAR MILL
AND ETHANOL PLANT**

Lisandra Guevara Orozco^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9940-9425>
Ana Celia de Armas Martínez¹ <https://orcid.org/0000-0002-0147-0704>
Erenio González Suárez¹ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia.
Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Diciembre 5, 2022; Revisado: Diciembre 12, 2022; Aceptado: Enero 11, 2023

RESUMEN

Introducción:

Los procesos de producción de azúcar crudo y alcohol etílico son de gran importancia para la economía cubana. En la actualidad estas industrias se han visto afectadas por la obsolescencia tecnológica y la carencia de nuevas tecnologías, por lo que es necesario aplicar la teoría de la fiabilidad para enmendar estos problemas.

Objetivo:

Optimizar la fiabilidad en las producciones de azúcar crudo y alcohol etílico en un central azucarero y destilería de etanol.

Materiales y Métodos:

La metodología propuesta considera un diagrama de trabajo que se basa, fundamentalmente, en la obtención de los datos de tiempo de trabajo sin fallo de los equipos, confección de los diagramas de fiabilidad de los procesos y determinación de la fiabilidad de ambos sistemas. Todo ello permite aplicar el método de Programación no Lineal de Enteros (PNLE) en Excel para obtener el número óptimo de equipos en cada etapa estudiada.

Resultados y Discusión:

La metodología propuesta permitió obtener el número óptimo de equipos que se deben colocar en cada etapa del proceso de fabricación de azúcar crudo y etanol.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Lisandra Guevara, Email: lgorozco@uclv.cu



Conclusiones:

Las fiabilidades actuales del central y la destilería son 0,02517 y 0,1719 respectivamente, las cuales son bajas debido a la obsolescencia tecnológica del equipamiento y sus frecuentes roturas lo cual puede ser enmendado con la asignación de nuevas redundancias a los equipos más vulnerables. Esta metodología permitió considerar por primera vez la disponibilidad de la instalación mediante los análisis de fiabilidad en la estrategia de desarrollo de una fábrica de azúcar como biorrefinería.

Palabras clave: fiabilidad; optimización; redundancias.

ABSTRACT**Introduction:**

The production processes of raw sugar and ethyl alcohol are of great importance to the Cuban economy. At present, these industries have been affected by technological obsolescence and the lack of new technologies, which means that it is necessary to apply the reliability theory to correct these problems.

Objective:

To optimize reliability in the production of raw sugar and ethyl alcohol in a sugar mill and ethanol distillery.

Materials and Methods:

The proposed methodology considers a work diagram that is essentially based on obtaining operating time data without equipment failure, drawing up process reliability diagrams and determining the reliability of both systems. This allows to apply the Non-Linear Programming of Integers (NLPI) method in Excel to obtain the optimal amount of equipment in each studied stage.

Results and Discussion:

The proposed methodology made it possible to obtain the optimum amount of units that must be placed at each stage of the raw sugar and ethanol manufacturing process.

Conclusions:

The current reliabilities of the plant and the distillery are 0.02517 and 0.1719 respectively, which are low figures due to the technological obsolescence of the equipment and its frequent breakages, which can be amended by assigning new redundancies to the most vulnerable equipment. This methodology allowed for the first time to consider the availability of the facility through reliability analysis in the development strategy of a sugar factory as a biorefinery.

Keywords: reliability; optimization; redundancies.

1. INTRODUCCIÓN

Las producciones de azúcar crudo y de alcohol etílico forman parte de los procesos tecnológicos fundamentales de la industria química cubana. En los últimos años esta industria se ha visto afectada en sus dos bases fundamentales: la actividad agrícola y la tecnología instalada, lo que ha provocado una disminución considerable de las producciones y por ende de las ganancias (de Armas, 2019). Esta carencia de nuevas

tecnologías y la obsolescencia del equipamiento instalado se traduce en problemas de fiabilidad.

En la industria química se define como fiabilidad la habilidad que tiene un sistema químico para realizar ciertas funciones considerando el valor de las características de operación entre límites dados, con ciertas condiciones de operación, almacenaje y transportación (González y col., 2005); (Morales y González, 2017). No es una predicción del funcionamiento correcto de un dispositivo durante un determinado número de horas, sino que es la probabilidad que dicho aparato funcione durante el tiempo especificado (Creus, 2005).

La disponibilidad anual de una instalación para ser empleada eficientemente desde el punto de vista tecnológico depende de la fiabilidad del sistema que la compone, visto esto, en la de los equipos que no garantizan la operación tecnológica para la cual han sido instaladas, por lo que debe ser un interés de los diseñadores de instalaciones de la industria de procesos químicos garantizar altos niveles de disponibilidad anual (Ley y col., 2021).

Por la importancia que tienen los análisis de fiabilidad en la industria química el objetivo de la presente investigación es optimizar la fiabilidad en las producciones de azúcar crudo y alcohol etílico en un central azucarero y destilería de etanol.

Esto permite considerar por primera vez los análisis de fiabilidad en la estrategia de desarrollo de una fábrica de azúcar en el concepto de biorrefinería.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar los análisis fiabilidad de los procesos de producción de azúcar crudo y alcohol etílico se empleó la metodología propuesta por (Alemán y col., 2021) la cual se muestra en la figura 1.

Para su aplicación se obtuvieron primeramente las probabilidades de tiempo de trabajo sin fallo de cada uno de los equipos de los procesos y se seleccionó la distribución de probabilidad a la que más se ajustan las secciones escogidas.

Posteriormente, se confeccionó el diagrama de fiabilidad de cada proceso permitiendo analizar las interacciones entre los equipos y usar la expresión adecuada para el análisis de fiabilidad. En este caso la expresión que se utilizó fue la 1, empleada por (Hernández, 2019).

$$P_s = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - r_i)^n] \quad (1)$$

En el caso del central y la destilería es casi imposible tratar el sistema en su integridad, por lo que se descompone en secciones. Esta descomposición permite ajustar el sistema a una estructura lógico-funcional y el cálculo de la probabilidad se emplea para determinar la fiabilidad del sistema en términos de la fiabilidad de las subdivisiones (Guevara, 2021).

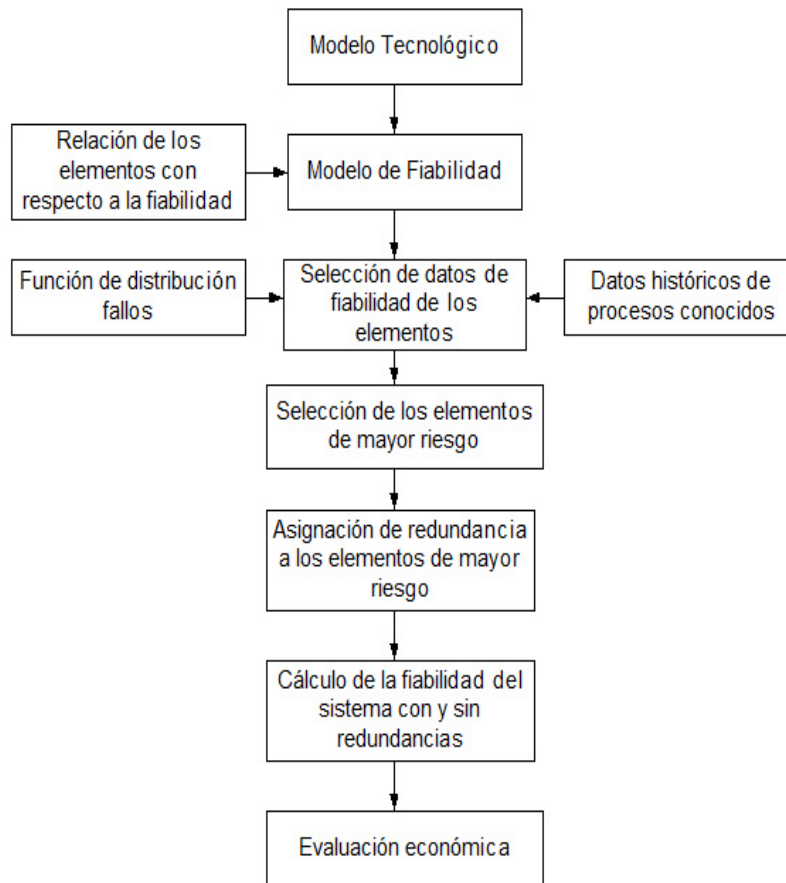


Figura 1. Metodología de trabajo para los análisis de fiabilidad en sistemas químicos

Para determinar la fiabilidad del central azucarero se dividió el mismo en cuatro secciones:

- Sección a: Contiene los equipos desde la estera hasta la bomba al tanque de meladura.
- Sección b: Contiene los cristalizadores 1 y 2 y las centrífugas 1 y 2.
- Sección c: Contiene los cristalizadores 3 y 4 y las centrífugas 3 y 4.
- Sección d: Contiene los cristalizadores 5 y 6 y las centrífugas 5 y 6.

De esta manera la expresión para el cálculo de fiabilidad viene dada por la ecuación 2:

$$R_{\text{Total}} = R_a * R_b * R_c * R_d \quad (2)$$

Donde R_a , R_b , R_c y R_d es la fiabilidad de los equipos correspondientes a las secciones a, b, c, y d respectivamente. La fiabilidad en la sección a, como son equipos ubicados en serie, se determina por la ecuación 3, mientras que la fiabilidad de las tres secciones restantes se determina por la ecuación 4 al ser equipos que se encuentran en paralelo y en serie, excluyendo los que tienen fiabilidad igual a uno.

$$\begin{aligned}
 R_a = & \text{Prob.TSF}_{\text{tándem}} * \text{Prob.TSF}_{B. \text{ tándem a colador}} * \text{Prob.TSF}_{B. \text{ a calentadores}} \\
 & * \text{Prob.TSF}_{B. \text{ a tanque preparaci ón de cal}} * \text{Prob.TSF}_{B. \text{ a clarificador}} \\
 & * \text{Prob.TSF}_{B. \text{ a preevaporadores}} \\
 & * \text{Prob.TSF}_{B. \text{ a tanque de meladura}}
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_{b,c,d} = [1 - (1 - Prob.TSF_{cristalizadores})^2] * [1 - (1 - Prob.TSF_{centrifugas})^2] \quad (4)$$

Para determinar la fiabilidad de la destilería se parte de que todos los equipos se encuentran en serie y son pocos los que sufren roturas con frecuencia, por lo que la expresión de cálculo viene expresada por la ecuación 5:

$$R_t = Prob.TSF_{B.T.cons} * Prob.TSF_{B.aferm.} * Prob.TSF_{I.C} * Prob.TSF_{B.Col.Dest} \quad (5)$$

Para realizar la optimización se emplearon los datos de fiabilidad de los equipos y los costos. Los primeros se obtuvieron en los análisis de fiabilidad y los de costo se obtuvieron actualizando el costo original de los equipos mediante la expresión:

$$Costo\ actual\ (\$) = Costo\ original(\$) * \frac{Índice\ actual}{Índice\ original} \quad (6)$$

Siendo el índice de costo original de 2006: 510 (González y Castro, 2012) y el índice de costo actual para 2020: 607,5 (Jenkins, 2020).

El método de optimización empleado fue la PNLE donde el objetivo es maximizar la fiabilidad. El planteamiento del problema es según la expresión 7 que es la función de fiabilidad del sistema:

$$\prod_{i=1}^m [1 - (1 - p_i)^{n_i}] \quad (7)$$

Sujeto a las restricciones de costo que se expresarán por la ecuación 8 y a las restricciones que provienen del balance de materiales y energía, según la ecuación 9, (Guevara, 2021).

$$\sum_{i=1}^m (C_i + O_i)n_i \leq CF \quad (8)$$

$$n_i \leq K_i \quad (9)$$

Donde:

Ci: costo de adquisición, (\$),

Oi: costo de operación, (\$),

CF: cantidad de capital disponible para la inversión, (\$),

Ki: número de unidades que deben funcionar en cada módulo, (adimensional).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fiabilidad actual de las instalaciones

Los resultados obtenidos de los datos de trabajo sin fallo para los equipos del central y la destilería se muestran en las tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1. Equipos que sufren roturas con mayor frecuencia en el central y sus probabilidades de trabajo sin fallo

No	Equipo	Probabilidad de trabajo sin fallo (Prob. TSF)	Función
1	Bomba del tándem al colador	0,6054	Exponencial
2	Bomba a calentadores	0,6334	Exponencial
3	Bomba del jugo al tanque de preparación de cal	0,6446	Exponencial
4	Bomba de jugo al clarificador	0,544	Exponencial
5	Bomba a los preevaporadores	0,6054	Exponencial
6	Bomba al tanque de meladura	0,6054	Exponencial
7-12	Centrífuga 1,2,3,4,5,6	0,8054	Exponencial

Tabla 2. Equipos que sufren roturas con mayor frecuencia en la destilería y sus probabilidades de trabajo sin fallo

No	Equipo	Probabilidad de trabajo sin fallo (Prob. TSF)	Función
1	Bomba al tanque de consumo diario	0,6054	Exponencial
2	Bomba a los fermentadores	0,6054	Exponencial
3	Bomba a la columna destiladora	0,6054	Exponencial

Los diagramas de fiabilidad se obtuvieron sobre la base de que ambos procesos responden a una estructura serie - paralelo bien definida con variantes de operación. En la figura 2 y 3 se muestran los diagramas de fiabilidad realizados para el central azucarero, el cual fue dividido convenientemente en secciones por la complejidad de la estructura tecnológica del mismo.

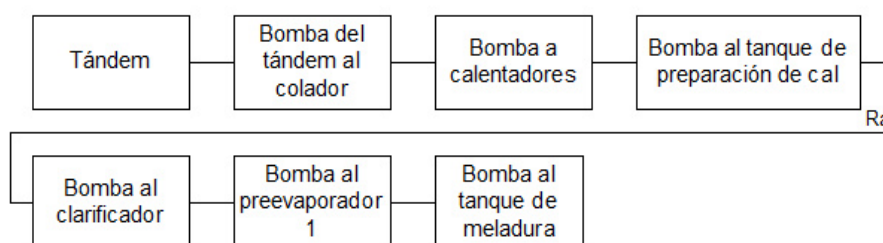


Figura 2. Diagrama de fiabilidad de la sección a

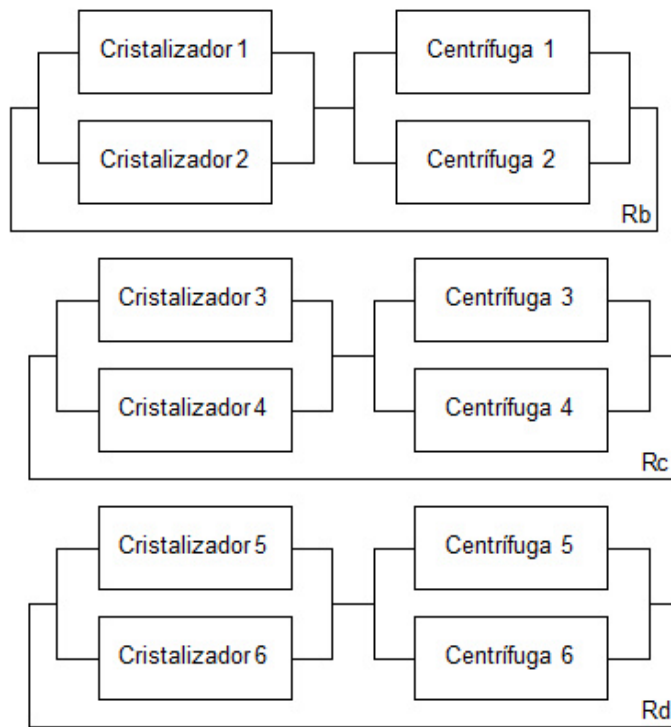


Figura 3. Diagrama de fiabilidad de las secciones b, c y d

Por su parte, la figura 4 muestra el diagrama de fiabilidad de la destilería, el cual es más simple pues la mayoría de sus equipos se encuentran conectados en serie.

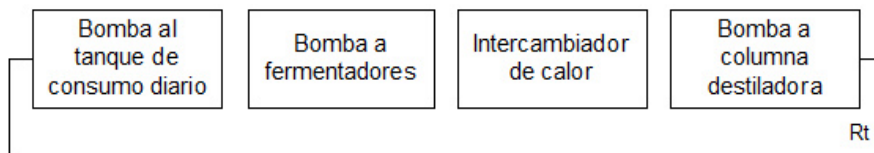


Figura 4. Diagrama de fiabilidad del proceso de obtención de alcohol

La fiabilidad actual del central se obtuvo mediante la ecuación 1, con un valor de 0,02517; que muestra la baja disponibilidad de la industria marcada principalmente por la baja fiabilidad de los equipos. Esto significa que los mismos sufren roturas con frecuencia, fundamentalmente los comprendidos en la sección a (Guevara, 2021). La fiabilidad de la destilería se calculó por la ecuación 5, con un valor de 0,1719; el cual es relativamente bajo y está condicionado por las frecuentes roturas de sus equipos móviles considerados (bombas).

3.2 Optimización de la fiabilidad en las industrias estudiadas.

Los valores de los costos actualizados se obtuvieron mediante la expresión 6 y son los que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Costo de adquisición de los equipos de baja fiabilidad

<i>Fábrica</i>	<i>Equipos</i>	<i>Costo de adquisición actualizado (\$)</i>
Central	Bomba del molino 3 al colador	12 934,99
	Bomba a calentadores	12 690,79
	Bomba al tanque de preparación de cal	12 690,79
	Bomba de jugo al clarificador	12 690,79
	Bomba a los preevaporadores	12 690,79
	Bomba al tanque de meladura	12 690,79
	Centrífuga 1,2,3,4,5,6	58 610,65
Destilería	Bomba al tanque de consumo diario	12 690,79
	Bomba a los fermentadores	12 690,79
	Bomba a la columna destiladora	12 690,79

La función de fiabilidad del central azucarero se obtuvo a partir de la expresión 7 y queda expresada por la ecuación 10.

$$\begin{aligned}
 Rt(\text{central}) = & [1 - (1 - 0,6054)^{n_1}] * [1 - (1 - 0,6334)^{n_2}] * [1 - (1 - 0,6446)^{n_3}] \\
 & * [1 - (1 - 0,544)^{n_4}] * [1 - (1 - 0,6054)^{n_5}] * [1 - (1 - 0,6054)^{n_6}] \\
 & * [1 - (1 - 0,8054)^{n_7}] * [1 - (1 - 0,8054)^{n_8}] * [1 - (1 - 0,8054)^{n_9}] \\
 & * [1 - (1 - 0,8054)^{n_{10}}] * [1 - (1 - 0,8054)^{n_{11}}] \\
 & * [1 - (1 - 0,8054)^{n_{12}}]
 \end{aligned} \tag{10}$$

Las restricciones están relacionadas con la cantidad de equipos, con la fiabilidad actual del sistema y con la máxima que puede alcanzar, así como el valor inversionista (VI) que se necesita para adquirir nuevos equipos, siendo:

$$n_i \geq 1 \quad i = 1 \dots 12$$

$$Rt(\text{central}) \geq 0,02517 \text{ y } Rt(\text{central}) \leq 1$$

$$V.I. \text{ equipos central } (\$) \leq 1\,070\,132,096$$

Donde el valor inversionista del equipamiento del central depende de la cantidad de equipos ubicados en cada sección y viene expresado por la ecuación 12.

$$V.I. \text{ equipos central } (\$)$$

$$\begin{aligned}
 = & 12,9 * n_1 + 12,6 * n_2 + 12,6 * n_3 + 12,6 * n_4 + 12,6 * n_5 + 12,6 * n_6 + 58,6 * n_7 \\
 & + 58,6 * n_8 + 58,6 * n_9 + 58,6 * n_{10} + 58,6 * n_{11} \\
 & + 58,6 * n_{12}
 \end{aligned} \tag{12}$$

De igual forma que para la producción de azúcar en la destilería, se confecciona la función objetivo, aunque esta es de menor complejidad que la anterior por los pocos equipos que se consideraron en el estudio. La función objetivo para la destilería viene expresada por la ecuación 13.

$$\begin{aligned}
 Rt(\text{destilería}) \\
 = & (1 - (1 - 0,6054)^{n_1}) * (1 - (1 - 0,6054)^{n_2}) * (1 \\
 & - (1 - 0,6054)^{n_3})
 \end{aligned} \tag{13}$$

Donde $Rt(\text{destilería})$ es la fiabilidad total de la destilería.

Así mismo, la ecuación 13 posee ciertas restricciones, las cuales están relacionadas con la cantidad de equipos, con la fiabilidad actual del sistema y con la máxima que puede alcanzar, así como con el monto económico que se dispone para adquirir nuevos equipos, siendo estas:

$$n_i \geq 1 \quad i = 1 \dots 3$$

$$Rt(\text{destilería}) \geq 0,1719 \text{ y } Rt(\text{destilería}) \leq 1$$

$$V.I.\text{equipos destilería} (\$) \leq 95\,180,95$$

El valor inversionista de los equipos en la destilería depende de la cantidad de equipos de acuerdo a la ecuación 14.

$$V.I.\text{equipos destilería} (\$) = 12,9 * n_1 + 12,9 * n_2 + 12,9 * n_3 \quad (14)$$

El empleo de la herramienta SOLVER de *Microsoft Excel* permitió obtener los resultados de la optimización, estos se muestran en las tablas 4 y 5 para la destilería y el central respectivamente.

Tabla 4. Resultados de la optimización en el central azucarero

<i>No</i>	<i>Equipo</i>	<i>Número de equipos óptimo</i>	<i>Número de equipos actual</i>
1	Bomba del tándem al colador	4	1
2	Bomba a calentadores	4	1
3	Bomba del jugo al tanque de preparación de cal	4	1
4	Bomba de jugo al clarificador	4	1
5	Bomba a los preevaporadores	4	1
6	Bomba al tanque de meladura	4	1
7	Centrífuga 1	2	1
8	Centrífuga 2	2	1
9	Centrífuga 3	2	1
10	Centrífuga 4	2	1
11	Centrífuga 5	2	1
12	Centrífuga 6	2	1

Tabla 5. Resultados de la optimización en la destilería

<i>No</i>	<i>Equipo</i>	<i>Número de equipos óptimo</i>	<i>Número de equipos actual</i>
1	Bomba a tanque de consumo diario	2	1
2	Bomba a fermentadores	2	1
3	Bomba a columna destiladora	2	1

Una vez conocido el número de equipos óptimos en cada una de las etapas de ambos procesos se puede obtener el valor de la fiabilidad sustituyendo el valor de las variables de decisión en las funciones de fiabilidad expresadas en las ecuaciones 7 y 13,

obteniéndose un valor de 0,6812 para el central y 0,6018 para la destilería respectivamente. Estas fiabilidades aumentan 27 veces con respecto al valor actual para el central y 3,5 veces para la destilería.

El valor inversionista aumenta a medida que se colocan nuevas redundancias a las instalaciones, por ello para obtener su valor óptimo se sustituye el número óptimo de equipos en las respectivas funciones de costo; obteniéndose un valor de \$ 1 008 883,35 y \$ 76 144,76 para el central y destilería respectivamente.

4. CONCLUSIONES

1. Las fiabilidades actuales del central y la destilería son 0,02517 y 0,1719 respectivamente, las cuales son bajas debido a la obsolescencia tecnológica del equipamiento y sus frecuentes roturas lo cual puede ser enmendado con la asignación de nuevas redundancias a los equipos más vulnerables.
2. Los valores óptimos de fiabilidad que en las condiciones actuales se pueden alcanzar para el central y la destilería son 0,6812 y 0,6018 respectivamente, por lo que es necesario trabajar en elevar esos valores y con ello la del complejo hasta valores que permitan un valor adecuado, a las exigencias productivas, de disponibilidad de toda la instalación industrial en época de molienda.
3. El número óptimo de equipos en todos los casos es superior con respecto a las condiciones actuales de las instalaciones, lo que provoca un aumento en el costo de adquisición total del equipamiento y con ello el valor inversionista, obteniéndose valores de \$ 1 008 883,35 y \$ 76 144,76 para el central y destilería respectivamente.
4. Esta metodología permitió considerar por primera vez la disponibilidad de la instalación mediante los análisis de fiabilidad en la estrategia de desarrollo de una fábrica de azúcar como biorrefinería.

REFERENCIAS

- Alemán, L., Hernández, C.B., Santos, R., Fleites, Y., y González, E., Optimización de la ganancia en una instalación industrial mediante inversiones que incrementan su disponibilidad operativa., *Tecnología Química*, Vol. 41, No 2, 2021, pp. 296-310. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v41n2/2224-6185-rtq-41-02-296.pdf>
- Creus, A., *Fiabilidad y seguridad, su aplicación en procesos industriales.*, Editorial Marcombo, Barcelona, España, 2005, pp. 11-19. https://books.google.com/books/about/Fiabilidad_y_Seguridad.html?hl=es&id=T6zqGALwitYC
- de Armas, A.C., *Evaluación de esquemas de biorrefinería de segunda y tercera generación en una industria azucarera cubana.*, Tesis Presentado en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2019.
- González, E., y Castro, E., *Aspectos técnico económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de caña de azúcar en el concepto de biorrefinería.*, Universidad de Jaén, España, 2012, pp. 1-32.
- González, E., Pedraza, J., Rosa, E., García, A., Rodríguez, I., Gallardo, I., Curbelo, A.,
-

- Villanueva, G., Lauchy, A., y Oquendo, H., Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria de procesos químicos fermentativos y farmacéuticos., Capítulo 3, Consideración de la fiabilidad de los equipos en el diseño, Editorial Científico Técnica, Cuba, 2005, pp. 49-72.
- Guevara, L., Optimización de la fiabilidad en producciones del complejo fabril Heriberto Duquesne., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2021. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/13091>
- Hernández, C.B., Optimización de la ganancia en una instalación industrial mediante inversiones que incrementen su disponibilidad operativa, Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2019. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/11578>
- Jenkins, S., Chemical Engineering Plant Cost Index Annual Average., Chemical Engineering, Marzo, 2020, pp. 1-3. <https://www.chemengonline.com/2019-chemical-engineering-plant-cost-index-annual-average/>
- Ley, N., González, E., Hernández, J.P., y Ramos, F., Contribución del diseño de instalaciones de la industria química a minimizar la incertidumbre a través de estudios previos inversionistas., Editorial Feijóo, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2021, pp. 125-162.
- Morales, M. y González, E., Evaluación de la fiabilidad en una industria diversificada a partir de la reconversión de sus instalaciones., Tecnología Química, Vol. 37, No. 1, 2017, pp. 1-11. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852017000100001

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Lisandra Guevara Orozco. Redacción - revisión y edición, investigación.
 - Dra.C. Ana Celia de Armas Martínez. Validación, metodología.
 - Dr.Sc. Erenio González Suárez. Supervisión, conceptualización.
-