

Optimización de la ganancia en una instalación industrial mediante inversiones que incrementen su disponibilidad operativa

Profit optimization in an industrial installation through investments that increase its operational availability

Lester Alemán-Hurtado¹ <https://orcid.org/0000-0002-3428-7869>

Claudia Beatriz Hernández-Rodríguez¹ <https://orcid.org/0000-0002-6661-4887>

Ronaldo Santos-Herrero² <https://orcid.org/0000-0002-5009-2084>

Yoelvis Fleitas-Avila^{2*} <https://orcid.org/0000-0003-4232-0646>

Erenio Gonzáles-Suárez² <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

¹Empresa Sergio Soto de Cabaiguán, Cabaiguán, Santi Spiritus, Cuba

²Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: yfavila@uclv.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un análisis de la importancia de minimizar la incertidumbre de las disponibilidades de los equipos en plantas en operación en relación a los fallos de operación de la planta, lo cual es solucionado por la inclusión de la fiabilidad en el procedimiento para evaluar alternativas de inversión para ampliar la ganancia de la planta en operación, aspecto que no ha sido suficientemente tratado, en la industria del petróleo cubana, con anterioridad. La metodología propuesta se apoya en un procedimiento matemático que posibilitó la utilización de un software que permite determinar la función de distribución a la que se ajustan los fallos, la confección y optimización del modelo matemático para obtener el número de equipos en cada una de las etapas y por último comparar las ganancias obtenidas actualmente con las que se obtendrán al realizar las redundancias necesarias. La validación de esta metodología se

logra a través de un ejemplo, lo que oportunamente demuestra la importancia de estas nuevas concepciones en el análisis de inversiones. El ejemplo empleado para la validación de la metodología fue la Refinería de petróleo “Sergio Soto de Cabaiguán”. La disponibilidad anual del sistema tecnológico se incrementa con las inversiones recomendadas en 0,58 a 0,79 y esto implica subir de una ganancia anual factible de \$ 4 237 206,8 a \$ 6 460 933,94. Fue utilizada la herramienta Solver del Excel.

Palabras clave: fiabilidad; ganancia; optimización.

ABSTRACT

In this work, an analysis is carried out of the importance of minimizing the uncertainty of the availability of the equipment in plants in operation in relation to the operating failures of the plant, which is solved by the inclusion of reliability in the procedure for evaluate investment alternatives to increase the profit of the plant in operation, an aspect that has not been sufficiently addressed in the Cuban oil industry, previously. The proposed methodology is based on a mathematical procedure that made it possible to use software that allows determining the distribution function to which the failures are adjusted, the preparation and optimization of the mathematical model to obtain the number of equipment in each of the stages and finally, compare the gains currently obtained with those that will be obtained when making the necessary redundancies. The validation of this methodology is achieved through an example, which opportunely demonstrates the importance of these new concepts in investment analysis. The example used for methodology validation was the “Sergio Soto” oil refinery in Cabaiguán. The annual availability of the technological system increases with the recommended investments from 0,58 to 0,79 and this implies going up from a feasible annual profit of \$ 4,237 206,8 to \$ 6,460 933,94. The Excel Solver tools was used.

Keyword: reliability; profit; optimize.

Recibido: 18/09/2020

Aceptado: 10/01/2021

Introducción

La Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán comenzó su producción en el año 1947 procesando solamente crudo extraído de Jarahueca con una producción de 400 barriles/día. Actualmente se refina el crudo nacional originario de la cuenca central, además del crudo de Varadero, y costa norte de las provincias de Matanzas, Mayabeque y La Habana.

Esta empresa al presentar tantos años de explotación, y la falta de repuestos conllevó al deterioro de los equipos, los cuales presentan fallos y problemas en su mantenimiento y reparación, lo que trae consigo que la producción se vea afectada por interrupciones, debido a fallos en los equipos, al mismo tiempo, la empresa no cumple con los planes establecidos por lo que afecta su desempeño económico.

Por tal razón, se ha decidido realizar una inversión, que incluye la adquisición de nuevos equipos, reemplazar los que se encuentran en peores estados de trabajo, y mejorar el mantenimiento de aquellos que puedan continuar funcionando, garantizando la capacidad requerida de producción.

La estimación de las capacidades necesarias en el diseño de una instalación de la industria química, está vinculadas en primer término a las demandas de los productos, de ahí los balances de materiales y energía y las ecuaciones propias de diseño nos permiten estimar las capacidades de que debemos disponer para lograr una producción determinada de un producto deseado. Sin embargo, no debemos olvidar que la instalación en operación desafortunadamente no siempre estará disponible para la operación, dificultades tecnológicas y muchas veces en el estado técnico de los equipos impedirán que la instalación garantice con los requerimientos del proceso productivo su operación continua, por ello toda instalación diseñada debe tener un margen entre la capacidad que se requiere anualmente del producto y sus capacidades de diseño, debiendo ser esta última lo suficiente mayor para que se garantice la primera aun con las pérdidas de tiempo de que hemos hablado antes. Este es un problema que debe ser resuelto a través, de métodos matemáticos.⁽¹⁾

Aquí se consideró que la inclusión de la fiabilidad de los equipos y con ello la de los sistemas tecnológicos en los análisis técnico económicos a través del efecto que tienen en la disponibilidad de la instalación, enriquece el enfoque multilateral de la estimación de la eficiencia de una inversión en etapa preliminar, pues brinda nuevos elementos que en muchos casos modifican decisiones tomadas sin estas consideraciones.⁽²⁾

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. Las características de fallo en muchos casos es el principal factor que gobierna la economía de un proceso. Por esto, para reducir el efecto adverso de las fallas, pueden realizarse inversiones en ciertas redundancias, las cuales deben aportar beneficios medibles económicamente al proceso, el costo de diseño y operación de tales redundancias debe ser menor que la ganancia obtenida por este concepto.

Como se comprende es necesario poder estimar con exactitud los valores de las inversiones tanto del proceso principal como de las redundancias y otras alternativas para incrementar la fiabilidad general del sistema tecnológico lo cual requiere una adecuada base de datos técnico económicos y métodos de estimación de costos de los equipos de la industria química como la mostrada en la literatura científica.^(3,4,5)

Materiales y métodos

El procedimiento utilizado en el estudio consideró el efecto de incrementar la fiabilidad del sistema tecnológico mediante el uso de redundancia en los equipos de más probabilidad de fallos, en la disponibilidad operativa de la instalación y con ello de los niveles de producción y la ganancia anual, valorando a la vez los gastos inversionistas que se originan a través de la estimación de las inversiones que se requieren para lograr cada incremento de la fiabilidad del sistema tecnológico.

La propuesta incluyó, en el diagrama heurístico para el análisis de inversiones en la industria el análisis de fiabilidad, como ya se explicó, se trató de maximizar la fiabilidad y

por tanto la disponibilidad con un costo mínimo. El diagrama de trabajo para el análisis de la fiabilidad que se utilizó en el ejemplo de la planta analizada se muestra en la figura 1

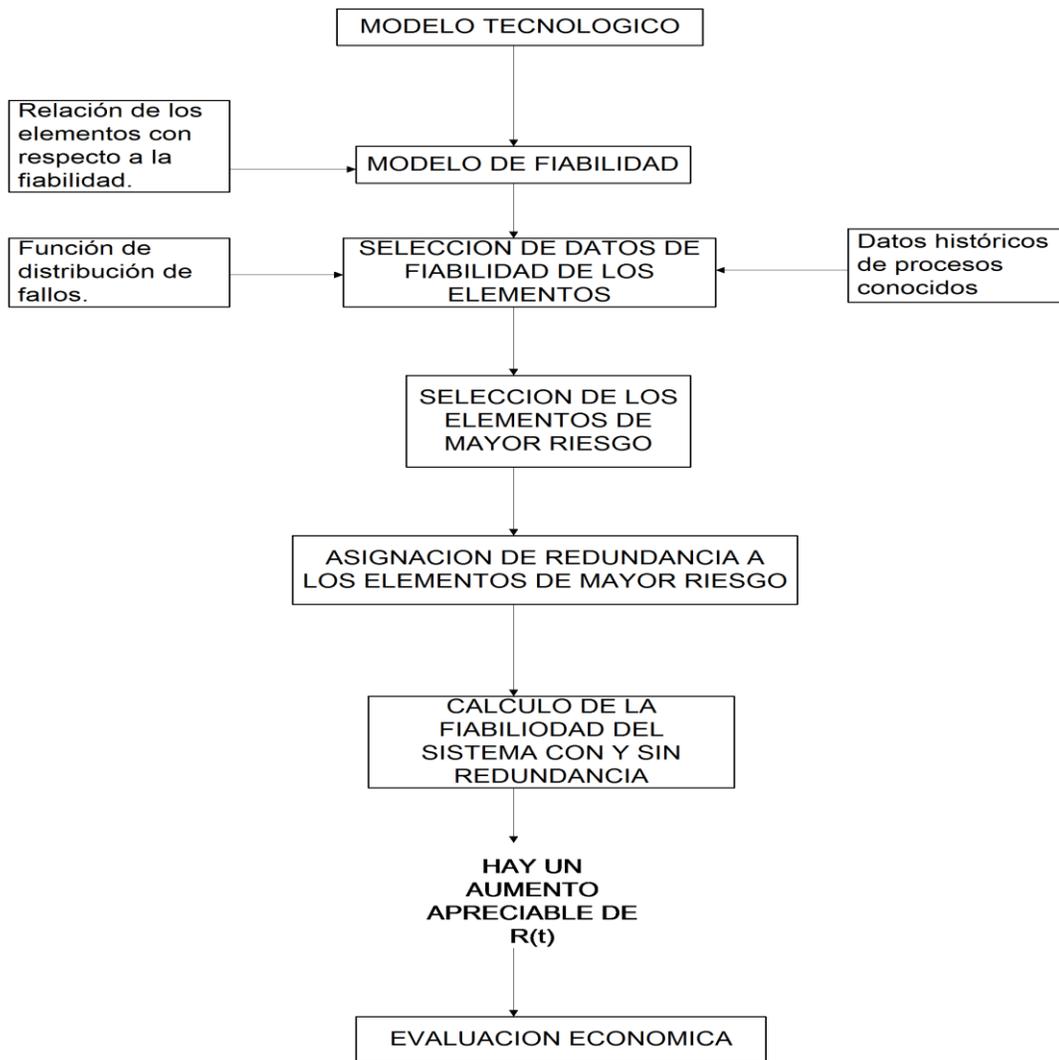


Fig. 1. Diagrama de trabajo para considerar la fiabilidad en el análisis inversionista.

Para el estudio de la fiabilidad de los componentes se utilizaron las funciones continuas de probabilidad, en el caso de la planta estudiada la distribución más usada fue la exponencial.

Para la obtención de la función de fiabilidad se confeccionó previamente el diagrama correspondiente

Y como función de fiabilidad (P_s) se utilizó la siguiente:

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

n_i - Número de equipos que deben colocarse en cada módulo

r_i - Fiabilidad de cada tipo de equipo.

Mediante la obtención de datos de costo y fiabilidad se realizó la formulación del modelo matemático basado en las combinaciones de costo y fiabilidad según lo planteado, en este modelo se incorporaron los resultados aportados en la cota mínima de cada uno de los elementos del sistema.

Para la optimización del proceso se utilizó la Programación No Lineal de Enteros. (PLNE), siendo el objetivo maximizar la fiabilidad, entonces la función a optimizar fue: ⁽⁶⁾

Maximizar

$$\prod_{i=1}^m [1 - (1 - p_i)^{n_i}] \quad (2) \quad \text{es la función de fiabilidad del sistema.}$$

Sujeto a las restricciones de costo que se expresarán por:

$$\sum_{i=1}^m (c_i + o_i)n_i \leq CF \quad (3)$$

donde

C_i es el costo de Adquisición

O_i es el costo de Operación

CF es la cantidad de capital disponible para la inversión

Y a las restricciones

$$n_i \geq K_i$$

En este caso K_i es el número de unidades que deben funcionar en cada módulo.

Una vez realizada la optimización se obtuvo el número óptimo de equipos en cada una de las etapas y la fiabilidad del sistema, lo cual se logró sustituyendo los valores óptimos obtenidos en la ecuación de fiabilidad del sistema que estaba en función de los mismos; posteriormente se calculó el tiempo medio entre fallos y la disponibilidad del sistema, sin la cual no era posible calcular el verdadero valor de ingresos anuales.

Los resultados que hasta este momento se habían logrado no permitían sin embargo obtener una información global sobre la rentabilidad de la futura instalación pues solo ha habido sido optimizada la planta desde el punto de vista de su repuesta ante los fallos de operación, pero no se habían contabilizado el efecto de los ingresos que se obtenían y los

costos de operación, razón que condujo a la selección del método de evaluación más conveniente.

Teniendo en cuenta las dificultades de los métodos convencionales y en particular el % de retorno simple se decidió el uso de los métodos dinámicos por las ventajas que ofrecen en la toma de decisiones de inversión.⁽⁷⁾

Una vez realizada la optimización por el método planteado se calculó el valor de la fiabilidad del sistema de acuerdo a la ecuación, sustituyendo los valores de cada una de las variables por el valor de redundancia óptimo.

También se permitió el cálculo de la disponibilidad de la planta (D) utilizando la siguiente expresión:

$$D = \frac{\int_0^t R(T) dt}{[\int_0^t R(t) dt + Tmto]} \quad (4)$$

Siendo:

Tmto: tiempo entre mantenimientos

R (t): fiabilidad en el tiempo t

Por ultimo para el análisis de alternativas se calculó el valor de la inversión y el costo de producción, y el valor de los ingresos a partir del valor de disponibilidad, para luego obtenerse el valor de la ganancia.

Resultados y discusión

En este caso se recopiló la información de la refinería “Sergio Soto Valdés”, para obtener la historia de fallos en los equipos esta se obtuvo a través de un programa presente en la industria denominado SAGERMAN , en el cual se tomaron datos de 3 años consecutivos de trabajo de la planta (2017-2019). En cada uno de los equipos se obtuvo los tiempo de fallos y los de trabajo sin fallo con el objetivo de determinar la funciones de distribución a que responden los mismos y la probabilidad de trabajo sin fallo la cual se obtuvo utilizando el programa STATGRAPHICS.Centurion.XV.

La información obtenida a su vez se incorporó a un fichero que contiene los parámetros de cada una de las funciones de distribución de los tiempos de trabajo sin fallo por unidad de estos resultados en futuros análisis de plantas con características similares. Ver tabla 1.

Tabla 1- Resultado del análisis de fallos

Equipos	Distribución	Probabilidad de trabajo sin fallo
Bomba de inyectos P-105A	Exponencial	0,66372
F-101 Horno de Atmosférica	Exponencial	0,57023
F-102 Horno de Vacío	Exponencial	0,664168
T-101 Torre destilación Atmosférica	Exponencial	0,884338
T-201 Torre Destilación al Vacío	Exponencial	0,606869
E-203A Intercambiador de calor	Exponencial	0,544506
E-203B Intercambiador de calor	Exponencial	0,775129
E-203C Intercambiador de calor	Exponencial	0,700466
E-203D Intercambiador de calor	Exponencial	0,609649
E-203E Intercambiador de calor	Exponencial	0,638854
E-203F Intercambiador de calor	Exponencial	0,813353
E-203G Intercambiador de calor	Exponencial	0,835476
E-203 H Intercambiador de calor	Exponencial	0,81415
P-101A Bomba de reflujo al tope	Exponencial	0,635577
E-103A Condensador de nafta	Exponencial	0,747293
T-102 Despojador de queroseno	Exponencial	0,67272
T-103 Despojador de diésel	Exponencial	0,557305
T-203 Despojador de R2	Exponencial	0,561548
D-103 Separador de tope	Exponencial	0,713581
D-201 Separador de vacío	Exponencial	0,587193
P-201 Bomba fondo vacío	Exponencial	0,548738
P-202 Bomba reflujo al tope de T-201	Exponencial	0,501584
P-203 Bomba	Exponencial	0,681829
P-205 Bomba de D-201	Exponencial	0,514789
E-201 Enfriador	Exponencial	0,715896
E-204 A Enfriador	Exponencial	0,803114
E-204 B Enfriador	Exponencial	0,875963

Fuente: Hernández Rodríguez, C. B., (2019)⁽⁸⁾

Como puede apreciarse, en la tabla aparecen todos los equipos de la planta, menos el tanque de almacenamiento de asfalto el cual se obtuvo su fiabilidad (R) a través de la ecuación:

$$R = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MDT}) = 0,62 \quad (5)$$

donde:

MTBF: tiempo medio entre fallos

MDT: tiempo medio entre paradas

Diagrama de Fiabilidad

Después de realizado el análisis cualitativo sobre la respuesta del sistema ante el fallo de uno de sus elementos se obtiene, como ha sido descrito,^(9, 10) el diagrama de fiabilidad, que tiene como característica una estructura serie paralelo bien definida con varias variantes de operación. En la figura 2 se presenta el diagrama de fiabilidad.

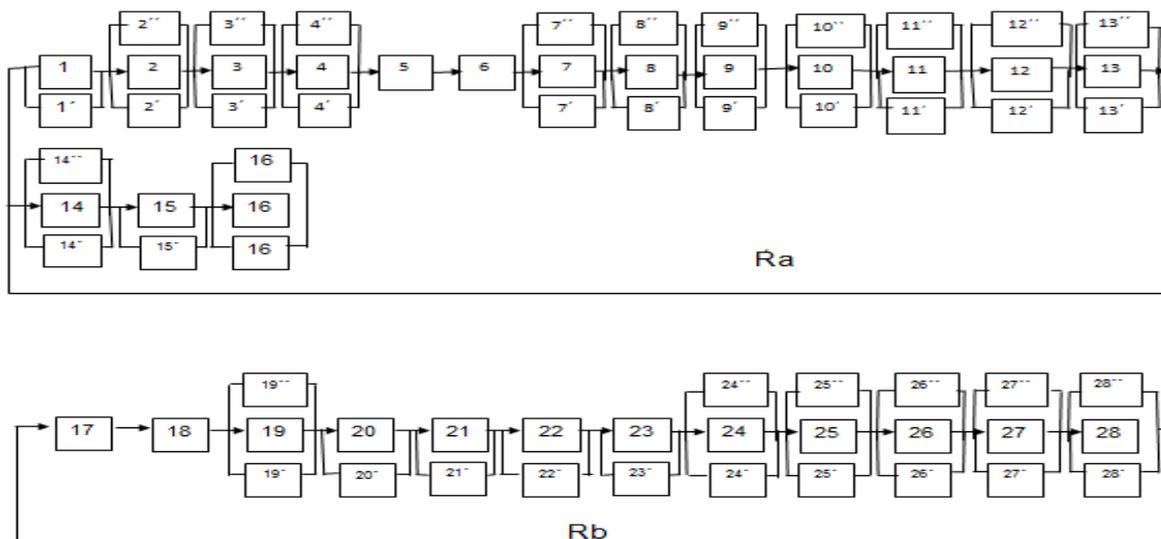


Fig. 2- Diagrama de fiabilidad del proceso tecnológico

Los datos de fallos de la tabla y la configuración del sistema con respecto a la fiabilidad permiten, utilizando la ecuación, obtener la función de fiabilidad del sistema.

Posteriormente para más facilidad se dividió el esquema en partes A y B como se muestra en el diagrama de fiabilidad (R) obteniéndose la siguiente función resultante

$$R_{total} = R_a * R_b \quad (6)$$

$$R_{total} = 0.032 \quad (7)$$

$$R_a = (1 - (1 - R_1)^2) * (1 - (1 - R_2)^3) * (1 - (1 - R_3)^3) * (1 - (1 - R_4)^3) * R_5 * R_6 * (1 - (1 - R_7)^3) * (1 - (1 - R_8)^3) * (1 - (1 - R_9)^3) * (1 - (1 - R_{10})^3) * (1 - (1 - R_{11})^3) * (1 - (1 - R_{12})^3) * (1 - (1 - R_{13})^3) * (1 - (1 - R_{14})^3) * (1 - (1 - R_{15})^2) * (1 - (1 - R_{16})^3) * (1 - (1 - R_{17})^3) \quad (8)$$

$$R_b = R_{17} * R_{18} * (1 - (1 - R_{19})^3) * (1 - (1 - R_{20})^2) * (1 - (1 - R_{21})^3) * (1 - (1 - R_{22})^2) * (1 - (1 - R_{23})^2) * (1 - (1 - R_{24})^3) * (1 - (1 - R_{25})^3) * (1 - (1 - R_{26})^3) * (1 - (1 - R_{27})^3) * (1 - (1 - R_{28})^3) \quad (9)$$

Una vez calculada la fiabilidad del sistema se procedió al cálculo de la disponibilidad (D) de acuerdo con la expresión siguiente:

$$D = R_{total} * T_{trabj} / [(R_{total} * T_{trabj}) + T_{mto}] \quad (10)$$

Siendo:

Ttrabaj: tiempo de trabajo

Tmto: tiempo de mantenimientos

D=0,58

Luego se determina el valor de la inversión (\$1 265 848,22) y el costo de producción (\$31 059 547,996), así también como los ingresos (\$31 580 869,43) los cuales son para un año de trabajo en la planta

Para luego calcular la ganancia a partir de la ecuación siguiente:

$$Ganancia = (Ingresos - CO) * Disponibilidad \quad (11)$$

Ganancia=4 237 206,8\$/año

Luego de obtenida la optimización a través del modelo seleccionado este nos mostró los valores de la fiabilidad óptima del sistema y su disponibilidad, así como el valor de la ganancia que presentara la empresa en él.

Fiabilidad del sistema óptima: $R_{total}=0,080$

Disponibilidad: $D=0,79$

La ganancia óptima que se determinó por el programa es:

Ganancia =6 460 933,94\$/año mientras que la actual es de: 4 237 206,8\$/año por lo tanto el incremento de la ganancia es de 2 223 727,94 y los indicadores son de: VAN=\$16 925 585,95, TIR= 40%, PRD= 3 años.

Los resultados de la optimización se muestran en la tabla 2, donde se obtuvo los números de equipos óptimos que se necesitan instalar en la planta.

Tabla 2- Número de equipos óptimo en cada etapa

Equipos	Diseño óptimo
1-Bomba de inyecto P-105A	4
2-F-101 Horno de Atmosférica	1
3-F-102 Horno de Vacío	1
4-T-101 Torre destilación Atmosférica	1
5-T-201 Torre Destilación al Vacío	1
6-E-203A Intercambiador de calor	3
7-E-203B Intercambiador de calor	3
8-E-203C Intercambiador de calor	3
9-E-203D Intercambiador de calor	3
10-E-203E Intercambiador de calor	3
11-E-203F Intercambiador de calor	3
12-E-203G Intercambiador de calor	3
13-E-203 H Intercambiador de calor	3
14-P-101A Bomba de reflujo al tope	4
15-E-103A Condensador de nafta	3
16-T-102 Despojador de queroseno	3
17-T-103 Despojador de diésel	3
18-T-203 Despojador de R2	3
19-D-103 Separador de tope	3
20-D-201 Separador de vacío	3
21-P-201 Bomba fondo vacío	4
22-P-202 Bomba reflujo al tope de T-201	4
23-P-203 Bomba	4
24-P-205 Bomba de D-201	4
25-E-201 Enfriador	3
26-E-204 A Enfriador	3
27-E-204 B Enfriador	3
28-Tanque de asfalto	4

Fuente: Hernández Rodríguez, C. B.,(2019)⁽⁶⁾

Plan de mantenimiento

Se requiere la programación de un plan de mantenimiento para los equipos que se analizó su probabilidad de fallo, el cual consiste en realizar una reparación un mes antes de la fecha de probabilidad de fallo, y una reparación general una semana antes de dicha fecha, para garantizar su óptimo funcionamiento. Los equipos analizados fueron: Ver tabla 3

Tabla 3- Equipos seleccionados.

Bomba de inyecta	Condensador de nafta
Horno Atmosférica	Despojador de queroseno
Horno Vacío	Despojador de diésel
Torre de Atmosférica	Despojador de R2
Torre de Vacío	Separador del tope
Intercambiador de calor E-203 A	Separador de vacío
Intercambiador de calor E-203 B	Bomba fondo vacío
Intercambiador de calor E-203 C	Bomba reflujó al tope
Intercambiador de calor E-203 D	Bomba P-203
Intercambiador de calor E-203 E	Bomba de D-201
Intercambiador de calor E-203 F	Enfriador E-201
Intercambiador de calor E-203 G	Enfriador E-204 A

Fuente: Hernández Rodríguez, C. B., (2019) ⁸

Conclusiones

1. Los métodos de la ingeniería de procesos químicos y el conocimiento de las características de los procesos tecnológicos obtenidos de las investigaciones o de información de la literatura deben complementarse para lograr una estimación adecuada de los valores de la inversión y el costo de producción.
2. La inclusión de la fiabilidad de los equipos y con ello la de los sistemas tecnológicos en los análisis técnicos económicos a través de su efecto en la disponibilidad de la instalación, enriquece el enfoque multilateral de la estimación de la eficiencia de una inversión brindando nuevos elementos que en muchos casos modifican decisiones realizadas sin estas consideraciones.
3. En la búsqueda del número óptimo de equipos en cada etapa puede ser utilizado el método de programación no lineal en enteros. La de este depende de las características del problema a analizar con respecto al número de equipos mínimos que deben operar en cada una de las etapas del proceso.

4. Es importante considerar en la evaluación económica de alternativas métodos dinámicos de evaluación de inversiones, pues la utilización simultánea de los mismos proporciona claridad en la rentabilidad de la planta.
5. La metodología propuesta puede ser usada en cualquier industria de procesos químicos, también sucede lo mismo con el programa de computación, pues el mismo está diseñado con flexibilidad e independencia en cada uno de los módulos.

Referencias bibliográficas

1. GONZÁLEZ SUÁREZ, E., R. CORTES MARTÍNEZ, J. E. MIÑO VALDÉS. Métodos Matemáticos en la estrategia de procesos para la solución de problemas en la Industria Química UNM. 2020 ISBN N° 978-987-86-2875-2
2. ROSA DOMÍNGUEZ, E., M. M. MARTÍN, E. GONZÁLEZ SUÁREZ. Necesidad de incluir los estudios de fiabilidad en el análisis inversionista. Centro Azúcar. Año 21, (1), Enero- Abril, 1994. 81-88. ISSN: 0253-5777
3. VILBRANDT F. C Y C. E. DRYDEN. Ingeniería Química del diseño plantas industriales. 1963, Editorial Grijalbo México. D. F.
4. PETERS M. S., K. D. TIMMERHAUS. Plant design and economics for chemical engineers. La Habana: Edición Revolucionaria.1971
5. GONZÁLEZ SUÁREZ, E, CASTRO, GALIANO E. (Editores).“Aspectos técnico económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de caña de azúcar en el concepto de biorrefinería”. Editorial Cooperación Iberoamérica y Espacio Mediterráneo. Jaén, España. 2012. ISBN: 978-84-8439-609-3
6. GONZÁLEZ SUÁREZ, E., W. F. QUEZADA MORENO, I. Y, GONZÁLEZ HERRERA. D N. CONCEPCIÓN TOLEDO, J E. MIÑO VALDÉS. Gestión del conocimiento para la industria química y fermentativa con apoyo de la optimización. UNM. 2018. ISBN: 978-950-766-133-4
7. LAUCHY CEÑUDO, A., C. LLANES LÓPEZ, E. GONZÁLEZ SUÁREZ; J. MACHADO LÓPEZ. La incertidumbre económica en las inversiones de plantas químicas a partir de biomasa /57. Centro Azúcar 1. 2003, ISSN: 0253-5777

8. HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, C. B. Optimización de la ganancia en una instalación industrial mediante inversiones que incrementen su disponibilidad operativa. Trabajo de diploma para graduarse de Ingeniero Químico. UCLV. Curso 2018-2019.
9. HAUPTMANN, U. Análisis de Arboles de Fallos; Ediciones Bellaterra, S. A. Barcelona. España. 1986. ISBN:84-7290-046-0
10. GONZÁLEZ SUÁREZ, E. Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria química, fermentativa y farmacéutica. Editorial Científico Técnica, La Habana, 2005, pp. 263, ISBN: 959-05-0377-2

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Lester Alemán-Hurtado: concibió la función objetivo para la optimización de las decisiones a ser evaluadas para el incremento de la disponibilidad de la instalación y coordinó las tareas investigativas en la empresa.

Claudia Beatriz Hernández-Rodríguez: obtuvo toda la información de la investigación directamente de la instalación estudiada y contribuyó al procesamiento de la información

Ronaldo Santos-Herrero, contribuyó a la redacción del artículo científico.

Yoelvis Fleites-Avila: participó directamente en la obtención de las condiciones óptimas para el incremento de la disponibilidad del sistema

Erenio Gonzáles-Suárez: coordinó todo el trabajo de investigación asesorando en sus tareas a cada uno de los participantes.