

La Incertidumbre en el Diseño de un Reactor para la Producción de Ácido Fosfórico

Pedraza Gárciga Julio ^a, <https://orcid.org/0000-0003-1780-5297>, (julio@uiss.edu.cu)
González Suárez Erenio ^b, <https://orcid.org/0000-0001-6963-1327>, (erenio@uclv.edu.cu)
Miño Valdés Juan Esteban ^{c*}, <https://orcid.org/0000-0003-1033-3506>, (minio@fio.unam.edu.ar)

^a Centro de Estudios Ambientales, Universidad de Sancti Spiritus “Jose Martí” (USS), Cuba

^b Dpto de Ingeniería Química, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV), Cuba

^c Dto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Argentina

Resumen

El objetivo de este trabajo fue hacer un análisis para el proyecto de un reactor en una instalación industrial para la producción de ácido fosfórico considerando la incertidumbre en los parámetros de diseño. Se incluyó una actualización del estado del arte de los métodos para considerar la incertidumbre en los procesos químicos, señalando las diferentes tendencias que se utilizan hoy en el mundo científico en el análisis y diseño de estos procesos. Se destacó la importancia tecnológica, económica y ambiental de estas técnicas y se ejemplificó a través del cálculo del volumen de un reactor para la obtención de ácido fosfórico.

Palabras Clave – Ácido fosfórico, Diseño, Incertidumbre, Reactor

Abstract

The objective of this work was to make an analysis for the project of a reactor in an industrial facility for the production of phosphoric acid considering the uncertainty in the design parameters. An update on the state of the art of methods for considering uncertainty in chemical processes was included, pointing out the different trends used today in the scientific world in the analysis and design of these processes. The technological, economic and environmental importance of these techniques was highlighted and exemplified through the calculation of the volume of a reactor to obtain phosphoric acid.

Keywords - Phosphoric acid, Design, Uncertainty, Reactor

1. Introducción

En los últimos años se incrementó el nivel de incertidumbre y complejidad de la vida social y de las transformaciones económicas, políticas, científicas y tecnológicas en un mundo cada vez más interdependiente.

Todo parece indicar que son precisamente las inciertas y complejas circunstancias que se presentan hoy ante la casi totalidad de las organizaciones, en cualquier lugar, lo que hace difícil suponer que estas pueden mantenerse y expandirse en el futuro sin contar con una apreciación suficientemente clara de los posibles caminos que se podrían emprender en adelante y de las implicaciones que tendrían las decisiones tecnológicas que se tomen en el presente en relación con el porvenir.

Tradicionalmente para el diseño de una instalación de la industria química, fermentativa o farmacéutica o para el análisis de la contaminación ambiental en sus múltiples formas se asume que:

- Los flujos y concentraciones son conocidos y estables;
- Los datos confiables de diseño están disponibles;
- Los modelos del proceso tecnológico son correctos.

Como se comprende, la suposición tácita de que para el diseño de un proceso se dispone de toda la información necesaria, no suele ser cierta, y lo que conocemos con certeza es que hay error en nuestros datos, usualmente errores en los modelos y los flujos, las temperaturas, las concentraciones cambian con el tiempo, por esto, el ingeniero debe moverse en un ambiente impreciso, en adición, desdichadamente, desde el momento en que se concibe un proceso industrial hasta su realización y maduración transcurre un período más o menos largo de tiempo y por otro lado no siempre está disponible toda la información para el diseño de una instalación o para una parte sustancial de esta.

Cuando se desarrollan nuevos procesos industriales, partiendo de procedimientos de laboratorio, se acrecientan las dudas para el diseño de la instalación industrial, toda vez que operaciones de manipulación de fluidos, calentamiento o separación por solo citar algunos se ejecutan en muchas ocasiones en el laboratorio por procedimientos impracticables industrialmente, por lo que deben proyectarse soluciones de ingeniería en el escalado industrial de estos procesos tecnológicos que necesariamente tendrán una gran incidencia en la factibilidad y viabilidad técnica, económica y comercial del proceso estudiado [1].

Coincidente con esta necesidad práctica, el Análisis Complejo de Procesos a través de su complejidad ha venido abordando con éxito la consideración de la incertidumbre tanto de la disponibilidad del equipamiento, como de los parámetros de operación de equipos e instalaciones industriales o para determinar la necesidad de la profundización científica a través de investigaciones previas basadas en los trabajos de los clásicos. Por lo que en el presente trabajo se aborda la incertidumbre en los procesos químicos, así como las vías más adecuadas para el análisis y diseño de estos procesos.

Precisamente, los problemas de incertidumbre en la ingeniería de procesos, así como los principios metodológicos para su consideración en el diseño de nuevas instalaciones fueron ordenados por Rudd y Watson en cuatro direcciones, a saber:

- Los aspectos relacionados con la determinación del mejor ajuste del diseño de un proceso a los cambios futuros;
- Los aspectos concernientes a la incertidumbre de los datos de diseño de los equipos;
- Los aspectos relacionados con la consideración de las fallas operacionales de los equipos componentes del proceso tecnológico o el diseño de instalaciones completas;
- Los aspectos relacionados con el efecto de las variaciones en el entorno en el diseño y operación de instalaciones de procesos químicos.

En adición a estos aspectos se mencionan considerando la experiencia de los últimos lustros, los estudios de incertidumbre financiera.

Como antecedentes y referidos en la mencionada obra en la literatura científica internacional aparecieron entre otros, trabajos como los de los mismos autores, sobre las correcciones en la incertidumbre de los proyectos [2], el de Twaddle y Malloy [3] considerando la dinámica económica en la evaluación de una nueva planta química, el de Villadsen [4] acerca del sobrediseño de una

columna de destilación, el de Kittrell y Watson [5] analizando el diseño de un reactor agitado en presencia de incertidumbre sobre la velocidad de reacción química, el del propio Rudd [1] sobre la teoría de la fiabilidad en el diseño de sistemas de la industria química.

Posteriormente han aparecido otros trabajos dirigidos a la consideración de la incertidumbre en la estrategia de procesos químicos, de los que resaltan entre otros la obra de Himmelblau [6] condensando toda una experiencia en la detección y diagnóstico de fallas en la industria química, así como los trabajos de Copen [7], Rose [8] y Bell [9] sobre la problemática de la planificación y la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre. También Boyce [10] trata los problemas de fiabilidad de un compresor centrífugo en línea, Gruhn Schmidt y Maver [11] analizan la fiabilidad en una instalación industrial. Watanabe [12], Huang [13], Brestovansky y Rippin [14] así como Lafferre [15] abordan la Gerencia e Incertidumbre; Scholz Hittorff y Schercker [16] presentan el diseño óptimo de instalaciones de la industria química considerando la fiabilidad y disponibilidad de los equipos. Badea [17] y Cutcutache [18] se refieren a los balances de materiales y de energía considerando la incertidumbre. El trabajo de Douglas [19] presenta el diseño y escalado de procesos en condiciones de incertidumbre.

En Cuba resaltan entre otros, los esfuerzos de Gallardo [20], Rosa [21], Pedraza [22], y Fuentes [23] resumidos y propuestos por González [24] en la consideración de la incertidumbre en la estrategia de procesos y en particular en la diversificación de la industria de la caña de azúcar.

Un estudio de esas características para una instalación de la industria química, fermentativa o farmacéutica requiere de diversos enfoques y métodos de eliminación de la incertidumbre en el diseño de la nueva instalación. Se debe considerar la experiencia acumulada en el escalado y diseño de nuevos procesos tecnológicos mediante plantas o equipos a escala piloto [25], así como el aporte que la aplicación de los métodos de modelación matemática ha hecho en la extrapolación de los resultados de laboratorio con ayuda del conocimiento fenomenológico de los procesos de la industria química, fermentativa y farmacéutica [26].

Estos trabajos han permitido acumular una experiencia metodológica importante fundamentando teorías de la forma de tratamiento de la incertidumbre, que dada la necesidad de tomar decisiones más robustas en el presente están siendo refinadas por la comunidad científica, pues, aunque no se puede eliminar completamente la incertidumbre han demostrado que sí se puede lidiar con ella efectivamente y con ello elevar el papel de la ciencia como fuerza productiva directa en lo cual lo modelos matemáticos tiene un papel significativo en la intensificación de procesos [27].

El objetivo de este trabajo fue hacer un análisis para el proyecto de un reactor en una instalación industrial para la producción de ácido fosfórico considerando la incertidumbre en los parámetros de diseño.

2. Materiales y Métodos

2.1. La Incertidumbre

Según Frey [28], la incertidumbre en su acepción más simple, se define como la carencia parcial o total del valor verdadero de una cantidad y puede ser debido a errores aleatorios en la medición, a

errores sistemáticos, a la carencia de una base empírica y a errores humanos entre otros factores. En la interpretación de los datos de pruebas, la incertidumbre puede provenir de:

- 1- Errores estadísticos en los datos.
- 2- Diferencias en la configuración entre la unidad de desarrollo del proceso a escala de laboratorio y una planta de escala comercial.
- 3- Problemas potenciales en el escalado de la unidad de desarrollo del proceso a un equipo de tamaño comercial.

Dicho autor afirma que la incertidumbre en los parámetros claves del funcionamiento de un proceso conducirán a incertidumbres en las características claves de salidas tales como eficiencia de la planta, costo o emisión de contaminantes.

Estos estimados de incertidumbre pueden estar basados en: juicios y opiniones publicados en la literatura, información publicada (cualitativa y cuantitativa), que puede ser usada para inferir un juicio acerca de la incertidumbre, análisis estadístico de los costos, juicios/ opiniones de un panel de expertos o de un experto en un área determinada.

2.2. Caracterización de las incertidumbres

En el diseño de plantas químicas con incertidumbre en los datos de diseño se reportan en las siguientes referencias bibliográficas: [1], [4], [5], [19], [22] y [25] como dos formas para caracterizar las incertidumbres que son:

- 1- Mediante distribuciones de probabilidad.
- 2- Mediante límites inferiores y superiores.

2.3. Métodos para atacar la incertidumbre en la Ingeniería Química

Según Gonzalez y colaboradores [29] la aproximación más común para manipular incertidumbres es o ignorarlas o usar un simple análisis de sensibilidad. En los análisis de sensibilidad los valores de un parámetro particular se varían desde un nivel bajo hasta un nivel alto, mientras todos los otros parámetros son mantenidos en sus valores nominales, observándose el efecto sobre algún parámetro clave de salida. En problemas prácticos, sin embargo, muchas variables de entrada podrían ser inciertas. La explosión combinatoria de posibles escenarios de sensibilidad rápidamente se convierte en inmanejable. Debido a esto es muy difícil identificar las variables de entradas para las cuales los resultados son más sensibles. Por tanto el análisis de sensibilidad no suministra la percepción de la probabilidad de obtención de cualquier resultado particular. Otra aproximación muy usada en los estimados de costos emplea factores de contingencia.

El método más utilizado para incorporar incertidumbre en el diseño de equipos de procesos y de plantas químicas es el conocido método de diseño clásico [30].

La aproximación clásica al diseño asume que:

1. No existen incertidumbres o variaciones en las corrientes de alimentación, en las temperaturas, en las velocidades de flujo y en sus composiciones.
2. En los métodos de diseño, las propiedades físicas y los modelos son exactos.

Bajo estas consideraciones se lleva a cabo el diseño y después que se concluye el mismo se tiene en cuenta un factor de sobrediseño (asignado por el calculista) para evadir las incertidumbres y asegurar

que el sistema al menos trabaje adecuadamente. Este factor de sobrediseño está basado principalmente en la experiencia y juicio del diseñador y puede variar desde un 15 a un 100 %.

Sin embargo el método clásico de diseño no satisface en las condiciones actuales el diseño de una planta química real por la gran cantidad de variables aleatorias involucradas, por la carencia de conocimiento sobre los valores de variables claves del proceso y porque el margen de error lo establece de forma intuitiva el propio diseñador, por tanto surge la necesidad de recurrir a métodos de diseño que tengan en cuenta todas las incertidumbres presentes en las principales variables del proceso.

Los otros dos métodos utilizados para la determinación de incertidumbres usan una aproximación estadística. El primero en usar una aproximación estadística al dimensionado de equipos de procesos y a la determinación de factores de sobrediseño fue Buckley. Aplicó su método en el diseño de intercambiadores de calor, sugiriendo que el tamaño del equipo (en éste caso área) debía ser calculado primero de valores nominales para temperaturas, velocidades de flujo, capacidades específicas y coeficientes de transferencia de calor. Entonces basado en la suposición que las incertidumbres siguen la curva de probabilidad normal, determinó las desviaciones estándar para cada variable, a partir de las incertidumbres individuales (desviaciones estándar), el efecto de cada una sobre la incertidumbre total del área se determina. Una vez que se conoce σ_a (el efecto global) o sea el factor de sobrediseño puede ser determinado de acuerdo al nivel de confianza deseado.

Otra aproximación estadística a la determinación de incertidumbres en el dimensionado de equipos de procesos ha sido sugerida por Berryman y Himmelblau [6]. Su método usa una simulación tipo Monte Carlo del equipamiento del proceso donde fluctuaciones aleatorias pero reales de las variables y parámetros de entrada son introducidos en cada simulación. Conociendo la incertidumbre en cada variable involucrada, un número aleatorio generado de una distribución normal, teniendo la misma media y desviación estándar se sustituye por la variable y el modelo estocástico para el proceso se evalúa; teniendo tantas simulaciones del equipamiento del proceso como se desee, la incertidumbre en el tamaño puede ser determinada a partir de las desviaciones estándar de la muestra de salida y el nivel de confianza deseado. Por este método se obtiene un factor de sobrediseño óptimo y se obtiene por tanto el valor más probable para el dimensionado de equipos de procesos.

Este método es el más utilizado para llevar a cabo estudios de incertidumbre y ha sido usado por Al-Zakri y Bell [9] en el diseño de una red de intercambio de calor y en el análisis de factibilidad técnico económica de nuevas plantas nucleares (producción de energía nuclear) en estudios para el desarrollo de plantas químicas innovativas y para la conformación de políticas ambientales, trabajos estos realizados con un altísimo nivel por Frey [28], del Departamento de Ingeniería Civil de North Carolina State University, que a juicio del autor es el especialista que con más rigor está trabajando y aplicando la temática de la incertidumbre en el mundo actualmente.

3. Resultados y Discusión

Pedraza [22] aplicó el método sugerido por Berryman y Himmelblau [6] o sea la simulación estadística de procesos utilizando una simulación tipo Monte Carlo al diseño de una planta para la producción de ácido fosfórico en Cuba de la cual se presenta el diseño de la etapa de reacción química.

3.1. Obtención de ácido fosfórico (H_3PO_4)

La obtención de ácido fosfórico (H_3PO_4) se realiza a partir de fosforita, mineral rico en $[Ca_3(PO_4)_2]$ y en $[P_2O_5]$.

Este proceso consta de tres etapas fundamentales [29]:

- Etapa 1 de reacción química,
- Etapa 2 de separación de los productos de la reacción
- Etapa 3 de recuperación de los gases desprendidos.

En la etapa 1 de reacción química: se añade a un reactor tipo tanque agitado y enchaquetado fosforita $[Ca_3(PO_4)_2]$ y ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) para obtener como producto principal de la reacción ácido fosfórico (H_3PO_4).

Las reacciones que ocurren son las siguientes:

Tabla 1. Reacciones Químicas

I	$Ca_3(PO_4)_2 + 3 H_2SO_4 = 3 CaSO_4 + 2 H_3PO_4$
II	$CaF_2 + H_2SO_4 = CaSO_4 + 2 HF$
III	$6 HF + SiO_2 = H_2SiF_6 + H_2O$
IV	$Na_2O + H_2SiF_6 = Na_2SiF_6 + 2 H_2O$
V	$K_2O + H_2SiF_6 = K_2SiF_6 + H_2O$
VI	$H_2SiF_6 + \text{calor o ácido} = SiF_4 + 2 HF$
VII	$3 SiF_4 + 2 H_2O = 2 H_2SiF_6 + SiO_2$
VIII	$Fe_2O_3 + 2 H_3PO_4 = 2 FePO_4 + 3 H_2O$
IX	$Al_2O_3 + 2 H_3PO_4 = AlPO_4 + 3 H_2O$

Fuente: elaboración propia (2021)

Si se denota por:

- A- Fosforita: $[Ca_3(PO_4)_2]$
- B- Gases que se desprenden de la reacción,
- C- Mezcla a la salida del reactor,
- E- Ácido sulfúrico: $[H_2SO_4]$
- G- Torta en la etapa de separación (Filtración)
- H- Ácido fosfórico: $[H_3PO_4]$

De experimentos a nivel de laboratorio se obtuvieron otras informaciones necesarias para el balance, como contenido de P_2O_5 en cada corriente [22].

3.2. Volumen del Reactor (método clásico)

A partir de balances de materiales y energía se determinan los flujos de proceso [22].

Haciendo un análisis del contenido del mineral y un estudio de cada una de las reacciones y mediante cálculos de balances se determina el consumo de H_2SO_4 .

Se consume ácido sulfúrico en la reacción I y II de la Tabla 1:

$$E_{\text{consumido}} = \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 65\% \text{ p/p en agua} = (0,7) A + (0,0036) A / 0,65 \quad (1)$$

De la estequiometria de la reacción se obtuvo que:

$$E [\text{H}_2\text{SO}_4] / A [\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] = 1,08 \text{ (t ácido sulfúrico / t fosforita)} \quad (2)$$

Pero se debe añadir un exceso de ácido sulfúrico debido al incremento de la velocidad total que eso implica, siendo la relación ácido sulfúrico/roca de fosforita de tres:

$$E [\text{H}_2\text{SO}_4] / A [\text{roca de } \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] = (3 \text{ t ácido sulfúrico / t fosforita}) \quad (3)$$

Se calcularon los siguientes términos para las reacciones de la Tabla 1:

Tomando como base $H = 5 \text{ t ácido fosfórico / día}$, se necesitaron hacer reaccionar

$A = 4,46 \text{ t roca fosfórica / día}$, con $E = 13,38 \text{ t ácido sulfúrico al } 65\% \text{ / día}$.

Con ésta reacción se obtuvo además $G = 5,13 \text{ t torta / día}$ y $B = 0,8 \text{ t gases desprendidos / día}$.

Con los valores de las corrientes se calcularon las características dimensionales del equipamiento y los requerimientos energéticos como son las potencias para la manipulación de los fluidos y la chaqueta de calentamiento del reactor.

Relaciones para el cálculo del volumen del reactor:

$$\tau_M = (C_{A0} \cdot V / F_{A0}) = (C_{A0} \cdot X_A / r_A) \quad (4)$$

donde:

C_{A0} = Concentración inicial de A,

F_{A0} = Flujo molar inicial de A,

V = Volumen del reactor,

X_A = Factor de conversión,

r_A = Velocidad de reacción de A,

τ_M = Tiempo medio

$V = 1,85 \text{ m}^3$ (calculada con la ecuación 4)

Por la espuma observada en el proceso de reacción y otros factores de seguridad se necesita dar un valor de sobrediseño; intuitivamente por la experiencia se toma un valor de 40 %:

$$V = 1,85 \text{ m}^3 \cdot 1,4 = 2,59 \text{ m}^3 \quad (5)$$

3.3. Análisis del diseño de la planta considerando incertidumbre.

Como variable aleatoria se seleccionó la composición de la materia prima, en este caso del mineral fosforita $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$.

Es de esperar, por tanto, que cambios aleatorios en la composición de la materia prima traigan aparejado cambios en las dimensiones de los equipos de procesos con respecto a los valores calculados para el diseño básico, por lo que es conveniente realizar el balance de materiales y energía considerando la incertidumbre en esa variable aleatoria [22].

3.4. Determinación de las funciones de distribución para cada variable

Para la determinación de las funciones de distribución de las variables inciertas (composición del mineral) se tomaron muestras del yacimiento, determinándose la composición de cada componente y a

través del software Statgraphics 5.0, se determinó la función de distribución con mejor ajuste, en cada caso, con sus estadísticos.

A continuación se muestran todos los resultados de las variables con sus estadísticos, así como, la función de distribución que mejor se ajusta.

Tabla 2. Resultados de las variables y función distribución (en t)

Componentes	Media	Varianza	Desviación	Distribución
P₂O₅	27,19	12,47	3,53	Normal
Fe₂O₃	5,16	3,12	1,76	Normal
CaO	43,58	44,09	6,64	Pareto
TiO₂	0,26	0,0009	0,03	Weibull
Na₂O	0,32	0,01	0,13	Rayleigh
CaCO₃	34,94	249,56	15,7	Log. normal
F	0,4	0,03	0,19	Rayleigh
Al₂O₃	5,81	4,02	2,060	Normal
SiO₂	0,22	11,65	3,41	Log. normal

Fuente: elaboración propia (2021)

Las ecuaciones del balance material se plantean simbólicamente (con posibilidad de variar las composiciones) dando como resultado un rango amplio de variación de las corrientes. Para un intervalo de confianza del 95 % en la distribución normal la $Z_c = 1,96$.

Ahora al calcular los parámetros de diseño se tienen en cuenta estos elementos y se calcula el sobrediseño necesario a cada componente del proceso, por ejemplo:

$$V = V_M + 1,96 \cdot \sigma \tag{6}$$

Dónde:

V_M = Volumen medio de la muestra de salida

σ = desviación típica de la muestra.

$V_M = 2,086 \text{ m}^3$ (con un rango de valores entre 1,56 y 2,78)

$\sigma = 0,387$

Reemplazando los valores y calculando se obtuvo el valor final del volumen del reactor:

$$V = 2,0869 + 1,86 (0,387) = 2,8458 \text{ m}^3 \tag{7}$$

Obsérvese que la diferencia sumada es de aproximadamente $0,76 \text{ m}^3$, lo que representa un factor de sobrediseño del 36 % referido al valor medio del volumen.

4. Conclusiones

- 1- La consideración de la incertidumbre en el análisis y diseño de procesos químicos es un factor que no puede ser obviado por su incidencia en un efectivo dimensionado de equipos en el proceso y por el enfoque global (considerando todas las variables, tanto operacionales como ambientales y económicas) que se pueden obtener en el análisis de los mismos.
- 2- Si bien en el diseño de equipos de procesos considerando la incertidumbre se obtienen dimensionados más grandes, incrementando por tanto los costos de inversión, se pueden obtener plantas químicas suficientemente flexibles capaces de asimilar fluctuaciones aleatorias de la composición de las materias primas, obteniéndose procesos operacionalmente más seguros.

Referencias

- [1] D.F. Rudd, C.C. Watson, "Strategy of Process Engineering". E.R., La Habana, 1980, pp. 269-273.
- [2] Z. Gaals, Z. Kovacs, " The reliability of the systems of chemical technologies". Hungarian Journal of Industrial Chemistry, 13 (3), 1985. pp. 181-191.
- [3] W.W Twaddle, J.B. Malloy, " Evaluating and Sizing New Chemical Plants in a Dynamic Economy". Chem. Eng. Progress. Julio, 1966.
- [4] J. Villadsen, "Report Chemical Engineering Dept. University of Wisconsin". 1966.
- [5] J. Kittrell, C.C. Watson, "Chemical Engineer Progress". April, 1965.
- [6] D.M.Himmelblau, "Process Analysis by Statistical Methods". New York, John Wiley & Sons, 1970, pp.3.
- [7] E.C. Copen, "The Difficulty of Assessing uncertainty". Elsevier Scientific Publishing, 1976.
- [8] C.M. Rose, "Engineering Investment Decisions: Planning under uncertainty" Amsterdam. Elsevier Scientific Publishing, 1976.
- [9] K.J. Bell, A.S. Al-Zakri, "Estimating Performance when uncertainties exist". Chemical Engineering Progress, Julio, 1981.
- [10] M.P. Boyce, "How to achieve outline reliability on centrifugal compressor". Chemical Engineering. New York. 85 (13) : 115- 127, 1978.
- [11] G. Gruhn, F. Schmidt; B. Maver, "Zuverlssigkeitsanalyse der Aufbereigungsanlage eines Kaliwarter" . Chem. Techn. 32 (9) 521-525, 1980.
- [12] T. Watanabe, "Management and Uncertainty". Paper 1c- 151. World Congress II of Chemical Engineering, Tokio, 1986.
- [13] W. Huang, "Financial and Macroeconomic Impact on International Petrochemical prices, demand and trade. The development and implementation of IMISP System ". Paper 1c- 152. Worl Congress II of Chemical Engineering, Tokyo, 1986
- [14] D. F. Brestovansky, y D.W.T. Rippin : "Managing the effects of competitive uncertainty: a case studies approach". Paper 1c- 153. World Congress II of Chemical Engineering, Tokyo, 1986.
- [15] T.H. Lafferre, "Hazardous Waste Disposal a taxing problem- Shrouded in Uncertainty". Paper 1c- 154. World Congress II of Chemical Engineering, Tokyo, 1986
- [16] A. Scholz, E. Hittorff, y G. Schercker, "Problems of Optimizing Plant Design with Respect to Reliability and Availability" . B4 . 4, CHISA '87, Praha, 1987.
- [17] L. Badea, A. Cutcutache, "Modeling of Heat Balances under Conditions of Risk and Uncertainty an Application". R6. 22, CHISA '84, Praha, 1984
- [18] L. Badea, A. Cutcutache, "Simultaneous material and Heat balances of a Process system under conditions of uncertainty". B8. 28, CHISA'87, Praha, 1987.
- [19] P.L. Douglas, "Design & Scale - Up Under Uncertainty. III Taller Internacional de Escalado, Habana 95, La Habana 1995.

- [20] I. Gallardo, “Análisis de alternativas para la ampliación y reconstrucción de fábricas en la industria del papel”. Tesis para la obtención del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), UCLV 1998.
- [21] E. Rosa Domínguez, “Análisis de alternativas de Inversión en la industria química considerando la fiabilidad de los equipos “Tesis para la obtención del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), 1996.
- [22] J. Pedraza Gárciga, “Estrategia para el diseño de una planta para la producción de ácido forfórico en condiciones de incertidumbre” Tesis para la obtención del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), 1997.
- [23] M. Fuentes Mora, “Determinación de la incertidumbre en el escalado y diseño de un combinado para la producción de aditivos oxigenados”, Tesis de Maestría en Análisis de Procesos” .UCLV.1997.
- [24] E. González Suárez, y J. Pedraza. “Escalado y diseño de instalaciones de la industria química en condiciones de incertidumbre”. III Taller Internacional de Escalado, Habana 95, La Habana 1995.
- [25] Valdés López, A., López Bastida, E. J., & León González, J. L. (2020). Methodological approaches to deal with uncertainty in decision making processes. *Revista Universidad y Sociedad*, 12 (1), 7-17. Sept.2020
- [26] D.N.Concepción Toledo, E González Suárez, J E. Miño Valdés. (2018). Una visión Actual de la ciencia como fuerza productiva directa. *Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos*, ISSN: 2218-3620. Volumen 10, Numero 4, pag. 54-58, julio-sept (2018)..
- [27] Cortés Martínez, R., Ramos Miranda, F., Miño Valdés J.E., Pérez Navarro O., González Suárez, E., (2020) Modelación y Simulación de Procesos en la Intensificación de Instalaciones de la Industria Química. *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación, +INGENIO*. Ed. FI-UNaM. Vol. 2 N° 2, julio-diciembre (2020), pag. 22-36 ISSN 2618-5520 on line
- [28] H. C. Frey, “Variability and uncertainty in highway vehicle emissions factors”. In *Emission Inventory: Planning for the Future*. October (2007), pp.208-219.
- [29] E González Suárez, J E. Miño Valdés & D. N. Concepción Toledo. *Gestión de Ciencia e Innovación Tecnológica en la Industria de Procesos Químicos*. ISBN N° 978-987-86-5854-4. Imp.Gráfica Libertad, Pdas Argentina. pag. 24-25. (2020).
- [30] J. E, Miño Valdés, E. González Suárez. *Contribución del Análisis de Procesos al Desarrollo de Instalaciones*. ISBN N° 978-987-86-2875-2. Imprenta Gráfica Libertad, Posadas Argentina. pag. 50-51. (2019)