

ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LOS RESULTADOS, A NIVEL INDUSTRIAL, DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN DE LA EMPRESA "PEDRO SOTTO ALBA"

ESTIMATE OF THE DISPERSION OF INDUSTRIAL, FOR THE NEUTRALIZATION OF THE COMPANY PLANT-LEVEL RESULTS, "PEDRO SOTTO ALBA"

Dra. Dania del Toro-Álvarez, MSc. Antonio Pons-Hernández, Dr. René Viera-Bertrán, Ing. Nolquis Pérez-Guilarte

Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
daniadt@fiq.uo.edu.cu

RESUMEN

Este trabajo se ocupa de la identificación de un intervalo de confianza, a partir de los datos de la operación de un proceso y de un software, que permita predecir los valores de pH obtenidos en una secuencia de reactores continuos con agitación conectados en series, en el que transcurren sistemas reaccionantes líquido-sólido no catalíticos, utilizado para la neutralización de licores ácidos en la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba", de Moa. Partiendo del modelo y del paso controlante del proceso de neutralización, identificado y confirmado en [7] y publicados en [5 y 6] respectivamente, y de un juego de datos de 18130 corridas de la planta, se determinaron las posibles corridas réplicas del proceso de neutralización. Luego, determinada la desviación estándar de los valores de pH reportados por la planta (pH4D), correspondientes a las réplicas obtenidas, se identificó un intervalo de confianza para esa variable, se realizaron pruebas de validación a éste intervalo y finalmente se realizó la comparación de los resultados obtenidos con el intervalo de confianza obtenido en [7] con el obtenido en este trabajo.

Palabras clave: neutralización, sistemas reaccionantes, paso controlante.

ABSTARCT

This work consist of the identification of an interval of trust, starting from the data of the operation of a process that it allows to predict the pH values obtained in a sequence of continuous reactors with agitation connected in series, in the one that non catalytic liquid-solid reaction systems, used for the neutralization of sour liquors in the Company "Comandante Pedro Sotto Alba", of Moa. Leaving of the pattern and of the controlling step of the neutralization process, identified and confirmed in [7] and published in [5 and 6] respectively, and of a game of data of 18130 of the plant, the possible races replicas of the neutralization process were determined. Then, certain the standard deviation of the pH values reported by the plant (pH4D), corresponding to the obtained replicas, an interval of trust was identified for that variable, they were carried out validation tests to this interval and finally he/she was carried out the comparison of the results obtained with the interval of trust obtained in the investigation previous with the one obtained in this work.

Keywords: neutralization, reaction systems, controlling step.

INTRODUCCION

Este trabajo se ocupa de la identificación de un intervalo de confianza obtenido a partir de datos de la operación industrial de un proceso y de un software obtenido en investigaciones precedentes, que sea capaz de predecir el comportamiento de un sistema reaccionante líquido-sólido no catalítico, en una secuencia de cuatro reactores continuos con agitación conectados en serie, donde la concentración del reactante en la fase líquida cambia de etapa en etapa y el tiempo de residencia medio de la primera etapa es distinto al de las etapas restantes. Una situación de este tipo se presenta en el proceso de neutralización del complejo tecnológico de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" de Moa, productora de sulfuros de níquel más cobalto. La función de esta planta radica en neutralizar el licor de Ni+Co que presenta una elevada concentración de ácido sulfúrico, con una pulpa de coral que contiene aproximadamente un 90 % de CaCO_3 .

La realización de este trabajo reviste gran importancia ya que los problemas actuales de la planta de neutralización de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" de Moa, dentro de los cuales se puede señalar: elevado consumo de coral y elevadas pérdidas de millones de dólares, pueden ser resueltos mediante el desarrollo de un modelo matemático que describa el comportamiento de cuatro reactores continuos con agitación conectados en serie. Sin embargo, este modelo para su validación requiere de la identificación de un intervalo de confianza que caracterice la magnitud de las diferencias observables, sin que se pueda alegar que un resultado difiere del reportado en la planta, puesto que al modelo del sistema no se le puede exigir una precisión mayor que al sistema mismo.

Aunque el modelo se orienta a las peculiaridades del sistema existente en la planta de neutralización de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" de Moa, por la generalidad de su concepción, su empleo puede extenderse a otros sistemas de

género similar, siempre que se utilicen los parámetros que correspondan a la situación de interés.

MATERIALES Y METODOS

- Localizar un período de trabajo de la planta de neutralización donde la misma haya seguido un comportamiento estable.
- Realizar acopio de información amplio, e identificar los datos requeridos así como su dominio.
- Identificar las posibles corridas réplicas del proceso de neutralización.
- Identificar el intervalo de confianza propio de la planta.
- Validar el intervalo de confianza.

FUNDAMENTO TEORICO

En el artículo [5] se presentó el desarrollo de un modelo matemático para el primer reactor de la batería, considerando partículas de tamaño fijo y como posibles pasos controlantes: la reacción química, la difusión en la costra y la difusión externa. El análisis permitió identificar que el paso controlante del proceso de neutralización es la difusión externa.

Posteriormente, en el artículo [6] sobre la base de esta identificación, se presentó el desarrollo de un modelo matemático para los cuatro reactores de la batería, y se identificó tentativamente un intervalo de confianza que permitió confirmar que el proceso de neutralización responde a un sistema reaccionante fluido-sólido no catalítico, modelo de núcleo sin reaccionar, partículas de tamaño fijo, y difusión en la película externa como paso controlante.

Una de las vías para establecer un intervalo de confianza es a partir de réplicas experimentales en un proceso; es por ello, que este es el objetivo central de este trabajo para luego compararlo con los resultados obtenidos en [7]. La práctica ha demostrado que la mayor parte de las mediciones y los experimentos varían de una repetición a otra, es decir, que aunque los valores de los parámetros sean idénticos los resultados reportados ya sea a escala de laboratorio, de escala piloto u otra, no serán coincidentes en todas sus cifras debido a los diferentes factores que inciden en el proceso como tal.

La obtención de replicas en el proceso de neutralización a escala de laboratorio se hace imposible debido a la gran cantidad de variables que influyen en él, y lo costoso que resultan realizar estas mediciones a nivel industrial.

Para determinar el grado de dispersión que introducen los diferentes factores en el proceso de medición o experimental se utilizan dos índices numéricos:

- La varianza muestral.

- La desviación estándar.

La varianza muestral se define como:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (1)$$

donde:

s^2 : Varianza muestral.

x_i : Valor de una observación puntual.

\bar{x} : Valor promedio o medio de todas las observaciones puntuales.

n : Total de observaciones.

La raíz cuadrada positiva de la varianza recibe el nombre de desviación estándar y se representa por la letra s .

Si la dispersión de los resultados se distribuye de manera normal, es decir, de forma campanada alrededor del valor medio de las observaciones o mediciones; se cumplirá lo siguiente.

- Aproximadamente el 68 % de las observaciones o mediciones se encontraran en el intervalo definido por: $\bar{x} \pm s$

- Aproximadamente el 95 % de las observaciones o mediciones se encontraran en el intervalo definido por: $\bar{x} \pm 2s$

- Aproximadamente el 99,7 % de las observaciones o mediciones se encontraran en el intervalo definido por: $\bar{x} \pm 3s$

La necesidad de obtener réplicas para identificar el intervalo de confianza propio de la planta de neutralización y las limitaciones que existen para su determinación, obligan a la búsqueda de un procedimiento que permita identificarlas a partir de los datos acumulados de la operación de esta planta. A continuación se presenta una propuesta de procedimiento posible a utilizar para identificar réplicas de un proceso industrial.

Procedimiento para identificar réplicas en un proceso a escala industrial

1. Localizar un período de operación lo más extenso posible para el cual la operación del mismo pueda considerarse como estable.

2. Seleccionar la mayor cantidad de datos acumulados (concernientes a los resultados y valores de las variables de trabajo) correspondientes al período localizado en el primer punto.

3. Identificar el dominio de variación correspondientes a cada una de las variables de trabajo; reteniendo como límites para los extremos de este dominio, valores que ocurran no menos del 1 % del total de las veces.

4. Realizar un análisis de sensibilidad, mediante el modelo matemático ajustado, de los resultados de interés del proceso con relación a las diferentes variables de operación y establecer un orden de prioridad que defina para cada clase de resultado cuales son las variables que ejercen la mayor influencia. Las variables respecto a los cuales, un resultado presenta los mayores coeficientes de sensibilidad son las que exigen una diferencia menor entre dos valores para considerar que las mismas constituyen réplicas.

Sabiendo que dada una función $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, el valor numérico del coeficiente de sensibilidad expresa el cambio en el valor de la función provocado por el cambio en una unidad de la variable X_1 , resulta claro, que atendiendo a los requerimientos de la precisión buscada en las predicciones de los valores de Y , es posible de manera iterativa buscar el intervalo inicial de variable guía, que conduzca al intervalo requerido en la variable controlante, garantizando al mismo tiempo, el número de réplicas resultantes que satisfaga los propósitos que se buscan en toda esta operación.

5. Una vez identificado el dominio de trabajo, para todos los datos de operación, se identificaría la variable que haya mostrado el coeficiente de sensibilidad más pequeño, la cual pasaría a ser la variable guía para el primer proceso de eliminación. Este proceso de eliminación consistirá en seleccionar de modo arbitrario, un subintervalo dentro del dominio básico de la variable, dentro del cual, pueda considerarse que los diferentes valores de la misma no ejerzan efectos significativos sobre el resultado de interés, siendo posible considerar que para fines prácticos, los valores contenidos en el subintervalo de esta variable, constituyen réplicas de la misma. Llegado a este punto, el proceso de eliminación continúa reteniendo como fichero de trabajo, todas las corridas que tengan los valores de la primera variable guía, contenidos en el subintervalo anterior.

La variable guía para el segundo proceso de eliminación, será la que presente el coeficiente de sensibilidad más pequeño entre las que aún no han sido procesadas; y el proceso de eliminación con ella, sigue la misma secuencia de pasos establecidos en el primer proceso de eliminación, pero utilizando como fichero de trabajo el resultante de la eliminación inmediata superior. Este proceso de eliminación continúa hasta llegar finalmente a la variable cuyo coeficiente de sensibilidad fue el más alto. En este punto el fichero de trabajo resultante, muestra el número de corridas que pueden considerarse como réplicas de todo el proceso; y en consecuencia, valorando la magnitud de este número, es posible corregir la amplitud utilizada desde un inicio para los subintervalos de cada una de las variables en el proceso seguido para la eliminación realizada en las operaciones anteriores.

Como se sabe el número de réplicas es un factor determinante de la magnitud y fiabilidad del valor estimado para la desviación estándar de las réplicas correspondiente a la operación del proceso que se estudie.

RESULTADOS

Para la identificación del intervalo de confianza es necesario primeramente identificar cuales pudieran ser corridas réplicas dentro del conjunto de corridas del proceso industrial; es por ello, que a continuación se presentan los resultados alcanzados en cada paso del procedimiento establecido para esa identificación.

Localización de un período de trabajo de la planta de neutralización donde la misma haya seguido un comportamiento normal. En la planta de neutralización se controla el proceso mediante sistemas automatizados, utilizando para ello un software llamado Citet, a través del cual se obtienen lecturas de las principales variables de operación, por intervalos de tiempo de diez minutos. Cada juego de datos constituye una corrida experimental a nivel industrial. Para el desarrollo de este trabajo fue necesario recopilar un conjunto de datos para un período amplio de trabajo estable de la planta correspondiente al año 2003.

La tabla 1 presenta una pequeña muestra de los datos de operación de la planta de neutralización obtenidos por el software antes mencionado.

Tabla 1
Muestra de datos para un periodo estable de la planta

No	QA (gal/min)	QC (gal/min)	QYL (gal/min)	QYS (gal/min)	Cae (gal/L)	PSC TK-A	PSC TK-B	PCSC	PSY TK-A	PSY TK-B	PCSY	pH4D
1	4126,13	295,07	539,00	1589,06	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,54
2	3900,19	274,61	516,56	1595,44	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,56
3	3498,00	248,44	528,50	1584,56	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,57
4	3507,56	237,15	522,19	1591,88	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,57
5	3498,75	251,33	542,38	1579,13	15,91	25,1	0	87,27	14,98	14,42	0,19	2,59
6	4122,56	282,83	522,88	1593,75	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,60
7	4125,19	275,27	519,56	1595,06	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,61
8	3502,31	236,89	529,56	1584,19	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,68
9	3504,94	254,36	531,19	1591,13	15,91	25,1	0	87,27	15,00	14,40	0,19	2,73
10	4128,38	286,05	531,88	1613,44	15,72	25,45	0	87,27	15,21	14,44	0,19	2,58
11	3140,63	195,79	522,13	1568,06	16,50	0	25,8	87,27	15,00	15,80	0,19	2,44
12	3137,25	235,35	522,25	1575,00	16,50	0	25,8	87,27	15,00	15,80	0,19	2,48
13	4072,50	285,24	530,00	1571,44	17,06	0	25,8	87,27	14,00	15,50	0,19	2,52
14	4091,25	288,24	530,31	1563,38	17,06	0	25,8	87,27	14,00	15,50	0,19	2,53
15	3719,44	263,42	544,88	1564,31	17,06	0	25,8	87,27	14,00	15,50	0,19	2,56
16	3022,69	240,28	493,38	1573,13	16,50	0	25,8	87,27	15,00	15,80	0,19	2,56
17	4098,00	291,28	520,69	1564,31	17,06	0	25,8	87,27	14,00	15,50	0,19	2,56
18	4026,38	294,02	524,38	1575,56	16,50	0	25,8	87,27	15,00	15,80	0,19	2,58
19	4095,19	298,71	532,25	1564,13	17,06	0	25,8	87,27	14,00	15,50	0,19	2,58
20	3524,44	246,54	543,06	1564,88	17,06	0	25,8	87,27	14,00	15,50	0,19	2,59

Las variables que se muestran en la tabla 1 se definen a continuación:

QAf: Flujo volumétrico total de licor ácido, gal/min.

QCf: Flujo volumétrico total de pulpa de coral, gal/min.

QY_s : Flujo volumétrico total de pulpa de yeso que sale de los sedimentadores, gal/min.

QY_L : Flujo Volumétrico total de Pulpa de Yeso a lavadero, gal/min.

CA_e : Concentración de H_2SO_4 en el Licor Ácido fresco, g/l.

$PSCTK$: Porcentaje de sólido en la pulpa de coral del tanque A, %.

$PSCTK$: Porcentaje de sólido en la pulpa de coral del tanque B, %.

$PCSC$: Porcentaje de $CaCO_3$ en los sólidos de la pulpa de coral, %.

$PSY TK$: Porcentaje de sólido en la pulpa de yeso del tanque A, %.

$PSY TK$: Porcentaje de sólido en la pulpa de yeso del tanque B, %.

$PCSY$: Porcentaje de $CaCO_3$ en los sólidos de la pulpa de yeso, %.

$pH4D$: pH de la corriente que sale del cuarto reactor, reportados por la planta.

Acopio de información, e identificación del dominio de los datos requeridos

Los datos de la tabla 1 necesitan ser expresados según las variables que se muestran en la tabla 2 y en el sistema internacional; es por ello que a continuación, se muestra una pequeña muestra de las 18130 corridas seleccionadas las cuales se van a utilizar para identificar las posibles corridas réplicas del proceso y el intervalo de confianza de la planta para su posterior validación.

Tabla 2
Muestra de datos para la identificación de las corridas réplicas de la planta

No	QA (m^3/min)	QC (m^3/min)	QY (m^3/min)	CaD (mol/m^3)	PSC (%)	PCSC (%)	PSY (%)	PCSY (%)	pH4D
1	15,809	0,620	85,36	96,73	27,40	86,17	17,20	0,48	2,64
2	11,206	0,620	6,330	153,47	25,60	81,74	17,25	0,10	2,68
3	10,803	0,621	6,916	135,41	29,40	84,06	14,85	0,24	2,84
4	9,858	0,621	86,61	170,20	28,50	87,27	15,90	0,24	2,61
5	11,484	0,621	6,980	153,47	31,80	83,79	15,65	0,24	3,17
6	11,964	0,621	85,89	147,96	28,00	86,69	17,00	0,54	2,86
7	11,424	0,621	7,016	153,47	31,80	84,34	15,65	0,24	3,14
8	11,238	0,621	5,124	156,12	31,90	86,55	12,25	0,29	2,59
9	10,890	0,621	5,195	140,82	30,60	86,55	15,50	0,29	2,61
10	11,270	0,621	4,965	156,12	31,90	86,55	12,25	0,29	2,60
11	12,954	0,622	7,245	158,68	30,00	83,79	16,80	0,19	2,53
12	9,862	0,622	86,59	170,20	28,50	87,27	15,90	0,24	2,64
13	17,601	0,622	5,475	155,62	33,50	86,28	18,95	0,24	2,48
14	11,432	0,622	6,172	141,94	29,00	83,23	14,60	0,14	2,68
15	11,137	0,622	6,432	157,35	30,30	83,79	15,20	0,19	2,68
16	11,268	0,622	5,583	146,22	29,70	86,55	13,75	0,29	2,59
17	11,282	0,622	5,397	146,22	29,70	86,55	13,75	0,29	2,59
18	11,234	0,622	5,152	142,15	29,90	86,55	13,80	0,29	2,70
19	16,635	0,623	6,159	123,87	34,30	83,79	16,10	0,14	2,24
20	15,886	0,623	85,30	119,69	30,50	86,17	15,45	0,49	2,67

donde:

QA: Flujo volumétrico total de licor ácido en m³/min.

QC: Flujo volumétrico total de pulpa de coral en m³/min.

QY: Flujo volumétrico total de pulpa de yeso recirculada en m³/min.

Ca0: Concentración de H₂SO₄ en el licor ácido fresco en mol/m³.

PSC: Porcentaje de sólidos en la pulpa de coral en

PCSC: Porcentaje de CaCO₃ en los sólidos de la pulpa de coral en %.

PSY: Porcentaje de sólidos en la pulpa de yeso en %.

PCSY: Porcentaje de CaCO₃ en los sólidos de la pulpa de yeso en %.

pH4D: pH de la corriente que sale del cuarto reactor, reportado por la planta.

Determinación del dominio de las variables de operación

Seleccionadas las 18130 corridas a utilizar en este trabajo, se procedió a identificar el valor máximo, promedio y mínimo de cada uno de las variables de operación, dejando de esta forma identificado el dominio en el que se mueven cada una de las variables del proceso de neutralización.

Este resultado se muestra en la tabla 3.

Tabla 3
Dominio de las variables de operación

Variables de operación	Valor mínimo	Valor promedio	Valor máximo
QA (m ³ /min)	9,251	15,239	19,251
QC (m ³ /min)	0,456	0,904	1,298
QY (m ³ /min)	2,771	5,911	9,712
Ca0 (mol/ m ³)	63,463	154,038	215,510
PSC (%)	24,000	28,545	35,709
PCSC (%)	81,741	85,649	87,800
PSY (%)	11,450	16,390	21,300
PCSY (%)	0,050	0,273	0,731
pH4D	1,911	2,576	3,291

A partir del dominio identificado se determinó donde están concentradas la mayor cantidad de corridas para cada una de las variables, es decir, cuantas corridas oscilan entre el valor mínimo y el promedio ó el valor promedio y el máximo como se muestra en la tabla 4; información que se sirve de base para la selección del subintervalo a escoger para cada variable del proceso.

Tabla 4
Ubicación de las corridas

Variables de operación	corridas entre mínimo y promedio Zona A	corridas entre promedio y máximo Zona B	Total de corridas
QA (m ³ /min)	8894	9236	18130
QC (m ³ /min)	9174	8956	18130
QY (m ³ /min)	3798	14332	18130
Ca0 (mol/m ³)	8688	9442	18130
PSC (%)	9628	8502	18130
PCSC (%)	6338	11791	18130
PSY (%)	7686	10444	18130
PCSY (%)	10542	7588	18130
pH4	6277	11853	18130

Realizar el análisis de sensibilidad a las variables de operación del proceso

Para realizar el análisis de sensibilidad, se retoma el análisis que se realizó en [], análisis que descansó en la determinación de los coeficientes de sensibilidad de cada una de ellas; por lo que a continuación, se relacionan las variables en orden decreciente según el coeficiente determinado.

Ca0: Concentración de H₂SO₄ en el Licor Ácido fresco en mol/m³.

QC: Flujo volumétrico total de pulpa de coral en m³/min.

QA: Flujo volumétrico total de licor ácido en m³/min.

PCSC: Porcentaje de CaCO₃ en los sólidos de la Pulpa de Coral en %.

PSC: Porcentaje de sólidos en la pulpa de coral en %.

PCSY: Porcentaje de CaCO₃ en los sólidos de la pulpa de yeso en %.

PSY: Porcentaje de sólidos en la pulpa de yeso en %.

QY: Flujo volumétrico total de pulpa de yeso recirculada en m³/min.

Identificación de la variable guía y proceso de eliminación de corridas hasta obtener las corridas réplicas de un proceso industrial

El análisis de sensibilidad mostrado anteriormente indica que la variable guía inicial es el flujo volumétrico total de pulpa de yeso recirculada (Qy) por ser la variable menos sensible en la respuesta del pH, luego el Porcentaje de sólidos en la pulpa de yeso (PSY) y así sucesivamente hasta llegar a la Concentración de H₂SO₄ en el Licor Ácido fresco (Ca0) que es la variable cuyo cambio provoca mayores cambios en la respuesta del pH.

Partiendo de las 18130 corridas, tomando como variable guía al flujo de yeso que se recircula a los reactores (QY) y teniendo en cuenta que la mayor concentración de corridas con respecto a esta variable, se encuentra en la zona B del dominio básico de la misma, se fija entonces, un subintervalo entre (6-7) m³/min, dentro de ese dominio, todas las corridas se organizan según este subintervalo con ayuda del programa Excel, el cual permite eliminar aquellas corridas que no se encuentren dentro de este subintervalo, quedando como resultado un total de 2 624 corridas.

Posteriormente, partiendo de las 2 624 corridas y teniendo en cuenta que la mayor concentración de corridas con respecto a esta variable, se encuentra en la zona B del dominio básico de la misma, se fija el subintervalo del por ciento de sólidos en

el yeso entre, se realiza el procedimiento descrito anteriormente lo que permite que queden como resultado corridas.

Este procedimiento se repite hasta llegar a la última variable. En la tabla 5 se muestran los valores del subintervalo escogido para cada variable y el número de corridas resultantes del proceso de eliminación según el intervalo utilizado.

Como se observa en la tabla 5 el último proceso de eliminación permite obtener 24 corridas réplicas; sin embargo, existen 6 corridas cuyo valores de pH están por encima del rango establecido por las normas (2,4-2,6); por lo que se procede a eliminarlas, quedando como resultado,18 corridas, que constituyen las posibles corridas réplicas del proceso de neutralización y que se muestran en la tabla 6.

Tabla 5
Valores de cada subintervalo y cantidad de corridas resultantes del proceso de eliminación

Variables de operación	Intervalo escogido	Cantidad de corridas resultantes
QY (m ³ /min)	6-7	2624
PSY (%)	16-17	685
PCSY (%)	0,1-0,191	530
PSC (%)	25-26	169
PCSC (%)	82,194-82,250	162
QA (m ³ /min)	17-18	106
QC (m ³ /min)	1,048-1,2137	106
CaO (mol/m ³)	141,39-141,94	24
pH4D	2,4-2,6	

Tabla 6
Posibles corridas réplicas del Proceso de la planta de neutralización

	QA (m ³ /min)	QC (m ³ /min)	QY (m ³ /min)	CaO (mol/m ³)	PSC (%)	PCSC (%)	PSY (%)	PCSY (%)	pH4D
1	17,626 3	1,128 2	6,603 2	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,55
2	17,771 8	1,080 9	6,019 8	141,936	25,100	82,750	16,700	0,191	2,56
3	18,006 7	1,061 1	6,037 3	141,601	25,114	82,750	16,680	0,191	2,57
4	17,698 7	1,123 6	6,669 9	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,58
5	17,639 8	1,124 0	6,682 0	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,58
6	17,614 9	1,124 1	6,630 9	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,58
7	17,649 0	1,114 0	6,663 7	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,59

8	17,491 0	1,122 0	6,578 8	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,59
9	17,656 1	1,123 3	6,620 2	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,59
10	17,477 2	1,052 7	6,082 9	141,936	25,100	82,750	16,700	0,191	2,59
11	17,674 6	1,115 0	6,687 2	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,59
12	17,631 3	1,120 1	6,572 2	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,59
13	17,637 7	1,118 5	6,552 8	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,59
14	17,770 4	1,088 4	6,047 0	141,936	25,100	82,750	16,700	0,191	2,59
15	17,776 8	1,085 4	6,126 9	141,936	25,100	82,750	16,700	0,191	2,59
16	17,612 1	1,118 8	6,636 8	141,936	25,300	82,750	16,100	0,191	2,59
17	17,610 7	1,085 2	6,111 5	141,936	25,100	82,750	16,700	0,191	2,60
18	17,753 3	1,105 3	6,311 7	141,390	25,319	82,750	16,400	0,191	2,60

Identificación del intervalo de confianza

Una vez que se determinan las corridas réplicas del proceso de neutralización, es conveniente determinar el grado de dispersión de dichas corridas a través de los índices que se utilizan para ello.

Varianza o desviación estándar. Estos resultados se reflejan en la tabla 7.

Tabla 7
Varianza y desviación estándar de las corridas réplicas de la planta

No	QA (m ³ /min)	QC (m ³ /min)	QY (m ³ /min)	CaO (mol/m ³)	PSC (%)	PSY (%)	pH4D
s ²	0,013 2	0,000 5	0,069 2	0,020 4	0,008 8	0,077 2	0,000 2
S	0,118 4	0,023 4	0,270 6	0,146 8	0,096 8	0,285 9	0,013 7

donde:

s²: Varianza de los valores de las variables reportadas por la planta.

s: Desviación estándar de los valores de de las variables reportadas por la planta.

Es válido aclarar que para los casos del PCSC y PCSY no aparecen en la tabla debido a que sus valores no varían. Teniendo en cuenta los elementos teóricos mostrados en el fundamento teórico y considerando un 95 % de confiabilidad, el intervalo de confianza para el pH a la salida de la batería de reactores observados en la planta se puede expresar de la siguiente manera:

$$pH\ 4D = pH\ 4 \pm 2S \quad (2)$$

De esta manera, queda definido el intervalo de confianza de la planta de neutralización, mostrado en la siguiente ecuación.

$$pH4D = pH4 \pm 2(1,0137) \quad (3)$$

$$pH4D = pH4 \pm 0,0274 \quad (4)$$

donde:

pH4: pH predicho por el modelo a la salida del cuarto reactor.

El se obtuvo como resultado del programa computacional obtenido en [7]; el cual facilita además la obtención de la concentración de ácido sulfúrico y el flujo molar de carbonato de calcio a la salida del cuarto reactor entre otros resultados, a partir de las variables definidas anteriormente.

Validación del intervalo de confianza

Una vez obtenido el intervalo de confianza del pH se seleccionan dos grupos de corridas; el primero, constituido por 25 corridas que se encuentran dentro de las 2624 corridas obtenidas en el primer paso de eliminación de las 18130 corridas iniciales, y el segundo grupo, constituido por otras 25 corridas que se encuentran dentro de las 18130 corridas iniciales; en ambos casos, las corridas no deben coincidir con ninguna de las 18 corridas réplicas, ni coincidir las seleccionadas en el grupo 2 con las del grupo 1.

Posteriormente se debe determinar el valor del pH4 para cada corrida de ambos grupos, a través del programa computacional anteriormente mencionado y así validar ese intervalo de confianza identificado. Estos resultados se observan a través de las figuras 1 y 2 respectivamente.

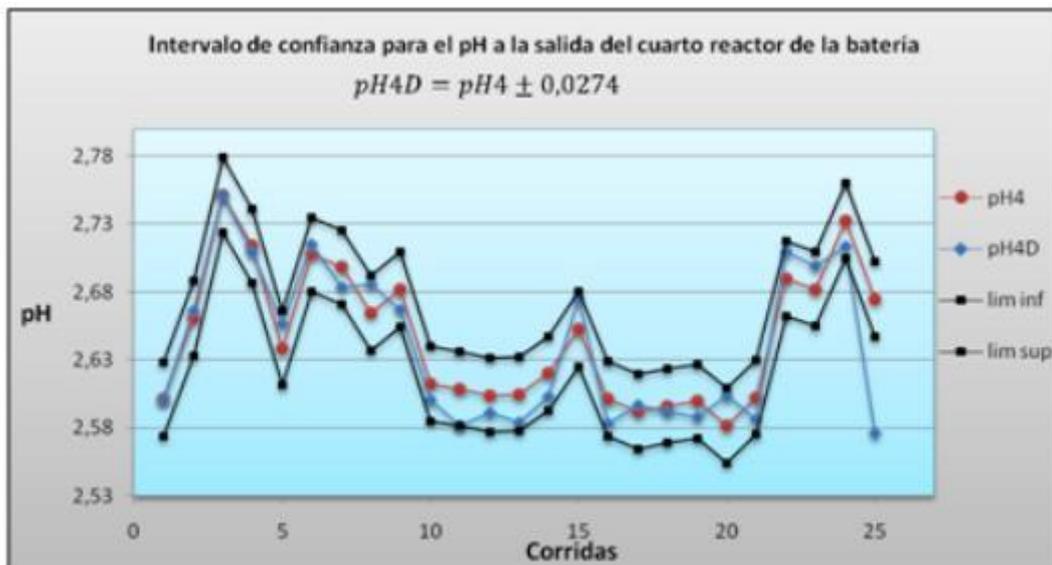


Fig. 1 Prueba de validación con el intervalo de confianza obtenido (primer grupo).

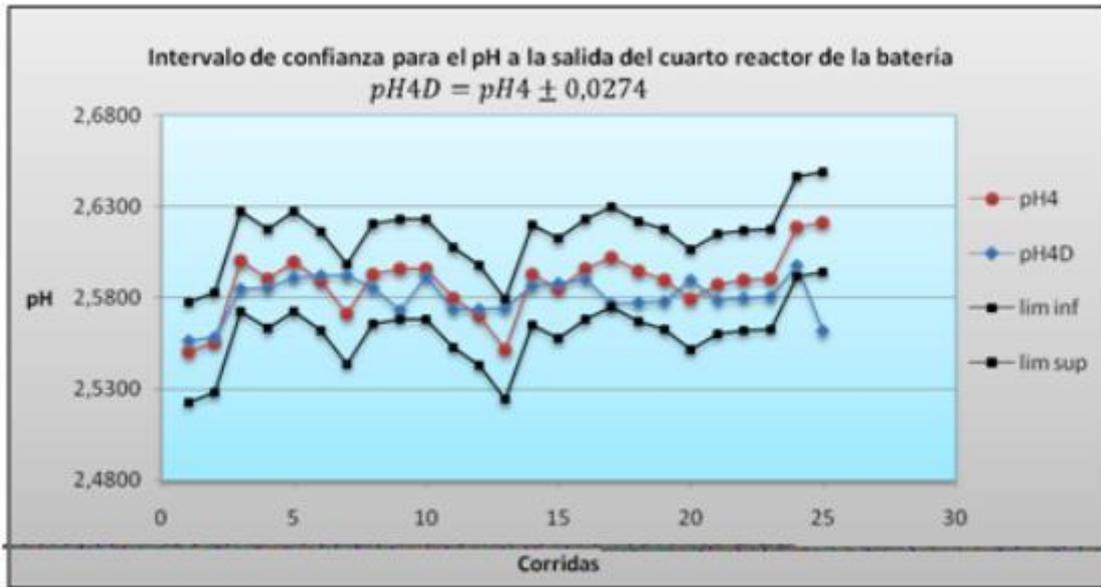


Fig. 2 Prueba de validación con el intervalo de confianza obtenido (segundo grupo).

Los resultados de la aplicación de este procedimiento se observan en las figuras 1 y 2, las cuales muestran la expresión para determinar los límites del pH reportados por la planta; esto quiere decir que para un valor de pH predicho por el modelo, $pH4 = 2,55$, el valor de pH medido en la planta oscila entre 2,522 6 y 2,577 4.

Las pruebas de validación con el intervalo de confianza obtenido, indica con toda claridad que aproximadamente el 95 % de los datos del pH a la salida del cuarto reactor reportados por la planta, se encuentran dentro de los límites establecidos para el intervalo de confianza identificado.

El intervalo de confianza obtenido en [7] se muestra a través de la figura 3; el cual permite comparar los resultados que se obtienen al aplicar este intervalo con el identificado en el presente trabajo.

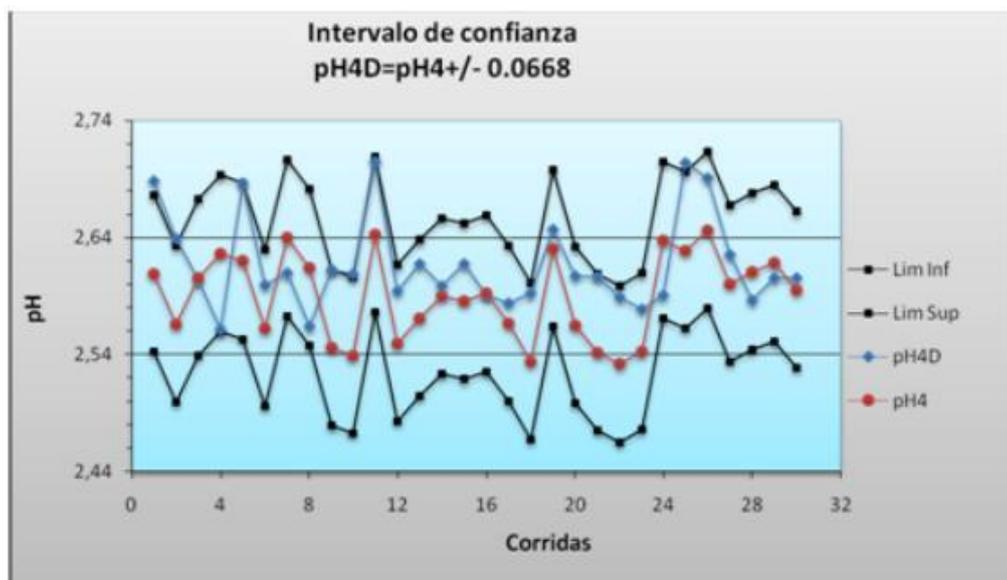


Fig. 3 Prueba de validación con el intervalo de confianza aplicado al pH a la salida del cuarto reactor, obtenido en [7].

A continuación se muestra un ejemplo del valor que se obtendrá en el pH a la salida del cuarto reactor, reportado por la planta al utilizar los dos intervalos de confianza. Para un valor de pH predicho por el modelo de 2.55.

- Por el intervalo de confianza obtenido en ésta investigación, el pH que se obtiene en la planta se encuentra entre 2,522 6 y 2 577 4.

- Por el intervalo de confianza obtenido en [7] el pH que se obtiene en la planta se encuentra entre 2,483 2 y 2,616 8.

La comparación de los resultados permite concluir que ambos intervalos reproducen el comportamiento de la batería de reactores; sin embargo, el intervalo de confianza obtenido en esta investigación, refleja la realidad de la batería de reactores con mayor precisión que el intervalo de confianza obtenido en [7], pues el valor de la dispersión en el primer caso es menor.

CONCLUSIONES

1. Se estableció un procedimiento que permitió identificar réplicas en el proceso de neutralización de la empresa "Comandante Pedro Sotto Alba", procedimiento aplicable a cualquier proceso industrial.
2. El intervalo de confianza identificado permite reproducir el comportamiento de los reactores de la planta de neutralización para un 95 % de confianza.
3. El intervalo de confianza obtenido permite predecir el comportamiento de la planta de neutralización con mayor precisión que el intervalo de confianza obtenido en la investigación precedente.

BIBLIOGRAFIA

1. AGUILAR-LÓPEZ R. "Integral observers for uncertainty estimation in continuous chemical reactors: algebraic-differential approach". Chemical Engineering Journal. vol. 93. 2003. Págs. 113–120.
2. BALASUBRAMANIAN V. y col. "Influence of secondary flow on diffusion with heterogeneous reaction" Chemical Engineering Journal. vol. 92, 2003. Págs. 15–26.
3. BAS, D. y col. "Modeling and optimization IV: Investigation of reaction kinetics and kinetic constants using a program in which artificial neural network (ANN) was integrated". Journal of Food Engineering. vol. 79. 2007. Págs. 1152–1158.
4. COSTA, P. "Eficiencia de micromezclado en tanques continuos agitados". Chemical Engineering. Vol. 55, No 14, 477, 1977.
5. DEL TORO, A. D., PONS, H. A, VIERA, B. R. "Identificación Básica del Modelo y el paso Controlante del Proceso de Neutralización". 2009.

6. DEL TORO, A. D., PONS, H. A, VIERA, B. R. "Confirmación del Modelo y El Paso Controlante del Proceso de Neutralización". Revista de Tecnología Química, vol. 30, Núm. 1, 2010.

7. DEL TORO, A. D. Modelo de Simulación para el Comportamiento de los Reactores de la Planta de Neutralización de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba". Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, 2007.

8. LEVENSPIEL, O. Ingeniería de la Reacciones Químicas, Barcelona, 1999. Editorial Reverté, 3ra Edición.

9. VIERA, B. R. y SOLER S. Diseño y análisis de reactores químicos. La Habana, 1991.

10. VIERA, B. R. y SOLER S. Modelación matemática para ingenieros químicos. Editorial Pueblo y Educación, 1988.

Recibido: Mayo de 2011

Aprobado: Septiembre de 2011

Dra. Dania del Toro-Álvarez. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. daniadt@fiq.uo.edu.cu