

**TITULO:** “ESCALADO DEL PROCESO DE DECOLORACION DE LA CERA DURA DE CANA DE AZUCAR POR VIA QUIMICA EMPLEANDO HIPOCLORITO DE SODIO”

**AUTORES:** Msc Juan B. de León Benítez

Dra. Gretel Villanueva Ramos

Dr. Iván Rodríguez Rico

### **RESUMEN**

El presente artículo tiene como objetivo fundamental, la selección y cálculo de los equipos necesarios para el desarrollo, en una mayor escala, del proceso de decoloración de la cera dura de caña de azúcar con hipoclorito de sodio en medio ácido, a partir de la información que brindan los modelos matemáticos obtenidos como resultado de pruebas de laboratorio del proceso en una menor escala realizada en trabajos anteriores.( 5)

Se realizó la evaluación del proceso de decoloración de la cera dura en un volumen de 2 litros, a partir de los datos que se obtienen luego de optimizar los modelos matemáticos que se determinaron en trabajos anteriores y posteriormente se escala el proceso hasta un volumen de 15 litros, seleccionando y calculando los equipos para esta capacidad.

**Palabras Claves:** Escalado, Decoloración, cera

### **SUMARY**

The present article has possessions as objectify fundamental, the selection and calculation of the necessary equipments for the unrolling, in a superior It escalades, of the decoloration process of the wax endures of cane with sodium hypochlorite in be at the middle acid, from onward the information that offer the attained mathematical models as result of taste laboratory of the process in a minor escalades carried out in work previous.( 5)

It is carried out the evaluation of the decoloration process of of the wax endures in a volume of 2 litres, from onward the data that are attain after optimize the mathematical models that are determined in work previous and posteriorly It is escaladed the process until a volume of 15 litres, selecting and calculating the equipments for this capacity.

Key words: scale up, decoloration, wax

### **INTRODUCCION**

La necesidad de reanimación de las Plantas Productoras de Cera Cruda en nuestro país

exigen del apoyo y desenvolvimiento de Tecnologías a partir de la Cera Dura de Caña de Azúcar, para que la misma se torne más competitiva comercialmente, resultados que pueden abrir nuevas perspectivas de aprovechamiento de la Cera Dura de Caña de Azúcar tomando las alternativas más factibles económicamente.

La cera de caña de azúcar dentro de los tipos de ceras vegetales que existen, posee una combinación de propiedades de remarcada importancia. Dureza, alto punto de fusión, extraordinaria capacidad de formar emulsiones, excelente retención de solventes; son algunas de las diversas propiedades que llevan a esta cera a tener un gran valor industrial.

Es conocido que la cera de caña de azúcar tiene su utilización garantizada en los más variados tipos de industrias destacándose textil, papel, alimentos, cosméticos, farmacéutica entre otras.

Algunas de estas industrias, como por ejemplo la farmacéutica, para fabricar numerosos productos, requieren de una cera dura beneficiada, en la cual sus propiedades físico químicas sean mejoradas substancialmente con la consecuente eliminación de su color y olor entre otras impurezas, todo lo cual se logra a través de modificaciones físico químicas de la misma dentro de las cuales se encuentra el proceso de blanqueo, lográndose al final una cera con las características más apropiadas para su uso.

En este artículo se resume el escalado del proceso de blanqueo de la cera Dura con hipoclorito de sodio en medio ácido.

### DESARROLLO

La decoloración por vía química empleando hipoclorito de sodio en medio ácido, es una variante con muchas posibilidades de aplicación de acuerdo con los resultados que se reportan en trabajos anteriores (5).

De aquí que se puede desarrollar el proceso de decoloración de forma experimental a una escala, mayor tomando para ello los valores óptimos de las variables de proceso obtenidas del estudio previo, según reporta (5), lo que permitirá la validación de los modelos matemáticos en un nivel superior de producción. Estos resultados pueden observarse en la Tabla No. 1, donde se muestran los modelos matemáticos obtenidos para cada variable de operación con su correspondiente valor óptimo.

**TABLA No 1:** Modelos matemáticos obtenidos para las Propiedades Físico Químicas en función de las Variables del proceso para la Decoloración de la Cera Dura con Hipoclorito de Sodio.

Prop. F-Q	Modelos Matemáticos	Cond. de Operación Optimas				Y
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	
Color	$Y=180.13-1.7X_1-16.85X_3+0.157X_1X_3-0.05739X_2X_4$	85	7.99	5.12	29.9	3.921
Pto Fus	$Y=75.06 +0.0496X_1-0.373X_3 + 0.431X_4$	85	--	0.12	30	80.51
Viscos.	$Y=0.2039+0.0426X_2X_3-5.00610^{-4}X_1X_2X_3+2.8.10^{-6}X_1X_4X_2$	70	8	5.12	29.9	0.55
Ind. Sap.	$Y=-51.99 +1.16X_1-0.216X_2X_4+25.86X_4^{1/2} + 2.6.10^{-5} X_1X_3X_4^2$	84.9	4	5.12	29.9	179.23

Leyenda :

X<sub>1</sub> : Temperatura ( C).

X<sub>2</sub> : Relación Hipoclorito / Cera.

X<sub>3</sub> : Concentración de Hipoclorito de Sodio (g/l)

X<sub>4</sub> : Concentración Volumétrica de Acido Sulfúrico.

Pto Fus : Punto de Fusión ( C).

Viscos. : Viscosidad (cP).

Ind. Sap. : Indice de Saponificación (mg KOH/ g Cera).

De acuerdo con (5), se plantea que se desarrolló el proceso de decoloración de la cera dura por vía química y de los resultados alcanzados, se concluyó que en el proceso de decoloración de la cera dura con hipoclorito de sodio en medio ácido, las operaciones principales son: la reacción química con agitación y la transferencia calorífica. El éxito de estas operaciones depende de una eficaz agitación y mezcla de los fluidos que intervienen y de la temperatura en el sistema de reacción

A partir de lo anterior es que se propone la selección de un reactor de tipo tanque agitado enchaquetado para desarrollar el proceso de decoloración de la cera con hipoclorito de sodio en medio ácido.

Cañizares (3) plantea, que cuando se procede al escalado de un reactor discontinuo, si el diseñador está seguro de que el problema de la transferencia de calor y el mezclado son solubles, no debe existir dificultad para desarrollar el mismo, por lo cual no es necesario la determinación de la cinética ni del mecanismo de reacción..

Bissio (2) reporta que existen varias formas de relacionar el diámetro del agitador D con la velocidad de agitación N como aparece en la tabla 2 que a continuación se muestra.

**Tabla No.2 Relación del diámetro del agitador D con la velocidad de agitación N.**

Regla de escalado	h'/h	Observaciones
1.Similitud dinámica (número de Reynold constante Re)	D/D'	No es muy usada

2.Tipo de agitador y velocidad de agitación constante	$(D/D')^{1-a}$	$a = 0.67$
3.Coeficiente constante	1	$N'/N=(D/D')^{(a-1)/a}$
4.Flujo de calor por unidad de volumen constante	$D/D'$	$N'/N=(D/D')^{(2a-2)/a}$
5.Potencia por unidad de volumen constante	$(D/D')^{(1.33a-1)}$	Poco cambio en el coeficiente h $a = 0.67$

Donde  $h/h$  es la relación de los coeficientes de transferencia de calor entre el prototipo y el modelo respectivamente.

Aiba (1) plantea que los parámetros más importantes a considerar en el escalado de los sistemas de mezclado son los que se reportan en la tabla No 3.

**Tabla No.3 Parámetros más usados para el escalado de sistemas de mezclado.**

Parámetros	Ecuación
Potencia / volumen	$PN^3D^5/V$
Torque / volumen	$N^2D^5/V$
Número de Reynold	$ND^2\rho/\mu$
Número de Froude	$N^2D/g$
Flujo	$NaND\rho$
Número de Weber	$\rho N^2D^3/\sigma$
Número de mezclado	$N$
Velocidad de cizallamiento	$\pi ND$

Potencia del agitador por unidad de volumen constante. Este criterio es apropiado cuando la tarea fundamental del agitador es el mezclado del líquido. Se considera que este es el criterio de escalado más usado (2), sobre todo en procesos controlados por carga.

A partir de este criterio se puede mantener constante la turbulencia en la descarga del agitador, sin embargo, trae como consecuencia una disminución en la velocidad rotacional del agitador con el consecuente incremento en el tiempo de circulación total, aunque la velocidad de cizallamiento se incrementa. También la capacidad total de bombeo por unidad de volumen disminuye. Por otra parte el número de Reynold se incrementa con el volumen escalado acorde a  $P/V$  constante. Se reporta además que la

turbulencia generada en la pared disminuye sustancialmente con el incremento del tamaño del vaso a partir de este criterio. (2)

Coefficiente de transferencia de calor constante. Este criterio es apropiado cuando el problema fundamental en el reactor es la eliminación del calor generado por la reacción.

Velocidad de cizallamiento constante. Este criterio mantiene constante la velocidad en el extremo de los agitadores. Es ampliamente usado para mantener la misma calidad de distribución de gases para reacciones rápidas.

Número de Reynold. El mismo trae como consecuencia una disminución drástica de casi todos los elementos que conforman el sistema de agitación.

Trambauze (7) señala, que para trabajos de mezclado simple uno puede escalar casi a cualquier escala a partir de pruebas pilotos. Para trabajos moderadamente difíciles usar una relación  $V/V'$  entre 4 y 10 es recomendable según el propio autor, aunque esto último no se considera económico en la mayoría de los casos.

La principal razón para realizar las pruebas pilotos es determinar el verdadero factor de escalado. Generalmente, son suficientes dos puntos en diferentes escalas para determinar el factor de escalado en la máxima escala. Sin embargo en aquellos casos donde tienen lugar cambios significativos en las propiedades de los fluidos con el tiempo, muchos más puntos son necesarios.

### **PARTE EXPERIMENTAL:**

A partir de los resultados de los modelos matemáticos optimizados por González Mesa (5), para la decoloración de la cera dura con hipoclorito de sodio en medio ácido, que establecen la influencia significativa que ejercen las variables de proceso, tales como: concentración de hipoclorito de sodio, relación hipoclorito / cera, concentración de ácido sulfúrico y temperatura del hipoclorito sobre las propiedades físico-químicas de la cera, desarrollar este proceso a una escala superior de dos litros para tratar 100 gramos de cera, siguiendo la técnica experimental reportada por el propio autor y que se describe a continuación.

Se toman 100 g cera dura oscura y se funden en un beaker de dos litros, empleando como medio de calentamiento agua, con el propósito de alcanzar la temperatura de fusión de la cera, evitando de esta forma la descomposición de la misma al exponerse a calentamiento directo.

Una vez fundida la cera, se añade a la misma de forma rápida, el ácido sulfúrico caliente (85 °C) en relación 2/1 a una concentración de 30% vol, hasta lograr una mezcla

homogénea de pH, aproximadamente 0.3 mediante agitación. Posteriormente se comienza a añadir cada 15 segundos y durante 3 minutos la cantidad de 8 partes de hipoclorito de sodio a 85 °C con la concentración de 10.50 g/l por cada parte de cera, manteniendo constante la temperatura y la agitación durante 10 min. Es oportuno destacar, que la decoloración ocurre de forma rápida, y que a la vez que se pone en contacto la cera con el hipoclorito se forman dos fases completamente inmiscibles produciéndose el burbujeo de vapores de cloro a través de la masa cerosa.

Posteriormente se procede al enfriamiento de la mezcla, para separar de la cera la solución clorada e iniciar el proceso de lavado de la cera decolorada con ácido clorhídrico 0.1N a la temperatura de trabajo (85 °C) y en la misma proporción que el hipoclorito. Luego de esto se comienzan los lavados de la cera decolorada con agua limpia y caliente a la misma temperatura.

Es importante destacar que siempre las soluciones residuales de ácido clorhídrico y agua que se emplean en el lavado de la cera decolorada, son separados de esta por enfriamientos de la mezcla y la evacuación de cada una en un tiempo aproximadamente de 15 min..

Cuando se decoloran 100 g de cera dura se producen alrededor de 5 litros de residual, que fundamentalmente además de ser líquido posee un bajo contenido de materia orgánica por las características del mismo, con un pH cercano a cero y un contenido de 2.4 mg/l de cloruro, de lo que se infiere que es necesario la neutralización del mismo antes de incorporarlo al alcantarillado.

Los resultados experimentales alcanzados que corresponden a la determinación de las propiedades físico-químicas de 100g de cera decolorada, aparecen reportados en la tabla No.4.

**TABLA No.4:** Resultados Experimentales de las propiedades físico-químicas de la Cera Decolorada.

VARIABLES					20g de Cera				100g de Cera			
EXP.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	IA	PF	IC	%D	IA	PF	IC	%D
1	85	8	5.12	30	33.3	79.0	3.60	88.3	33.5	79.0	3.58	88.0
2	85	8	5.12	30	34.2	78.0	3.63	89.9	30.8	80.0	3.36	88.8
3	85	8	5.12	30	32.1	80.0	3.30	92.0	31.2	79.0	3.63	89.9
4	85	8	5.12	30	30.0	79.0	3.00	92.0	29.2	79.8	3.09	89.7
5	85	8	5.12	30	29.0	82.0	2.85	91.7	28.6	80.1	3.52	88.3
6	85	8	5.12	30	33.7	79.8	2.94	90.5	30.5	79.0	3.0	91.0
7	85	8	5.12	30	30.8	80.0	3.00	90.2	31.7	80.0	2.98	90.1
8	85	8	5.12	30	31.2	79.5	3.45	91.7	29.5	79.8	3.09	89.7
9	85	8	5.12	30	33.6	81.0	3.50	90.5	31.2	79.0	3.36	88.8

10	85	8	5.12	30	33.4	79.0	3.30	92.0	33.5	80.5	2.70	91.0
MI	-	-	-	-	33.6	75.0	30.0	-	33.6	74.0	30.0	-

X<sub>1</sub>: Temperatura (°C).

X<sub>2</sub>: Relación Hipoclorito / Cera.

X<sub>3</sub>: Concentración de Hipoclorito de Sodio (g/l)

X<sub>4</sub>: Concentración Volumétrica de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

IC: Índice de Color.

PF: Punto de Fusión (°C).

%D: Porcentaje de decoloración

Esta permite establecer una comparación entre los resultados experimentales de las propiedades físico-químicas de la cera decolorada alcanzadas por González Mesa (5) al tratar 20g de cera y los obtenidos en el presente trabajo para 100g de cera bajo las mismas condiciones. Obsérvese que los valores de estas propiedades y el por ciento de decoloración son similares en ambos casos, de lo que puede inferirse que existe una adecuada validación del comportamiento de los modelos matemáticos reportados por González Mesa (5), al utilizar la información que brindan los mismos en el desarrollo del proceso de decoloración para una mayor cantidad de cera (100g), corroborándose que son estas las condiciones bajo las cuales se puede decolorar la cera dura con hipoclorito de sodio en medio ácido.

Sobre la base del estudio realizado en el reactor de 2 litros se comienza el escalado del equipo, para tratar 1000 g de cera por día, lo que implica la necesidad de utilizar un reactor con una capacidad de 15 litros, si tenemos en cuenta las demás corrientes a alimentar.

Según la literatura (2) el criterio de escalado más usado para procesos controlados por carga y en los que la tarea fundamental es el mezclado de los líquidos, es el de potencia por unidad de volumen constante. Partiendo de este criterio y de que existirá similitud geométrica entre el modelo y el prototipo se realiza la siguiente metodología de escalado.

Del modelo se tienen los siguientes datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

Volumen total (Vt)	2 lt
Volumen efectivo (v)	1.2 lt
Diámetro del reactor (Dr)	0.128 m
Diámetro del impelente (D= 0.5.Dr)	0.064 m
Velocidad de agitación (N)	150rpm

Altura total del tanque (H)	0.165 m
Altura de llenado del tanque (h)	0.093 m
Coefficiente total de transferencia de calor ( $U_D$ )	1136.36 W / m <sup>2</sup> °C
Temperatura del sistema de reacción (Tr)	85 °C
Temperatura del medio de intercambio (Tm)	95 °C
Area de transferencia de calor ( $A_{TC}$ )	0.05 m <sup>2</sup>
Reynold (Re)	3.3.10 <sup>4</sup>
Potencia del agitador ( $P = Np \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5$ )	0.007W

De acuerdo con lo planteado en el epígrafe anterior se escalará el proceso a una capacidad de 15 litros.

Criterios que se siguieron para el escalado:

1. *Similitud geométrica.*

$$D' / D'r = D / Dr = (V't / Vt)^{1/3}$$

$$D' / D = D'r / Dr$$

$$D'r = (15 / 2)^{1/3} = 1.96 * 0.128 \text{ m} = 0.25 \text{ m}$$

2. *Criterio P / V constante.*

$$V' = 10 V$$

$$(P / V) = (P' / V')$$

$$(Np \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 / V) = (Np \cdot \rho \cdot N'^3 \cdot D'^5 / V)'$$

$$(N^3 \cdot D^5) / V = (N'^3 \cdot D'^5) / 10V$$

$$(N^3) / (N'^3) = (D'^5) / 10(D^5) = (0.125)^5 / 10(0.064)^5 = 2.84$$

$$(N^3)' = 0.352 \cdot (N^3) = 0.352 \cdot (150)^3 = 1188000$$

$$N' = 106 \text{ rpm}$$

### **Consecuencias del escalado sobre otros parámetros.**

Prototipo 15 litros

Parámetros	Modelo 2 litros	P'	(P/V)'	N'	D'	ND'	Re'
P	0.007						
(P/V)	0.005	0.08	1	1.8	0.125	0.225	9.2.10 <sup>4</sup>
N	2.5	0.21	0.02	1	0.125	0.313	1.3.10 <sup>5</sup>
D	0.064						

ND	0.16	0.03	0.003	1.3	0.125	1	$6.6 \cdot 10^4$
Re	$3.3 \cdot 10^4$						

Datos del prototipo

Volumen total (V't)	15 lt
Volumen efectivo (V')	12 lt
Diámetro del reactor (D'r)	0.25 m
Diámetro del impelente (D' = 0.5.D'r)	0.125 m
Altura total del tanque (H')	0.316 m
Altura de llenado del tanque (h')	0.245 m
Temperatura del sistema de reacción (T'r)	85 °C
Area de transferencia de calor (A'TC)	0.24 m <sup>2</sup>

Seguidamente a partir de los resultados del escalado obtenidos anteriormente, se realizan los cálculos necesarios para el dimensionamiento de la chaqueta.

#### **Dimensionamiento de la chaqueta del reactor de 15 litros.**

Cálculos	Ecuaciones	Datos	Resultados	Referencia
Masa de agua de calentamiento para la chaqueta.	$Q_g = Q_c$ $[m C_p(\Delta t)]_m = [m C_p(\Delta t)]_{\text{agua}}$	$m_m = 11 \text{ kg}$ $C_{p_m} = 3.59 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ $\Delta t_m = 58^{\circ}\text{C}$ $C_{p_{\text{agua}}} = 4.18 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ $\Delta t_{\text{agua}} = 15^{\circ}\text{C}$	36.55 kg	Balanc e de energía
Diámetro de la camisa	$d_{\text{cam.}} = D_r + 2L$	$D_r = 0.25 \text{ m}$ $L = 0.1 \text{ m}$	0.45 m	Perry
Area física de transferencia de calor	$A_f = A_b + A_L$ $= \pi D_r^2/4 + \pi D_r h$	$h = 0.245 \text{ m}$	0.24 m <sup>2</sup>	
Calor necesario para calentar la mezcla a 85°C	$Q_g = [m C_p(\Delta t)]_m$		546.63 kCal	Requer , del proces

				o
Coeficiente pelicular de transferencia de calor	$h_j = j \cdot k / D_j \cdot (C_p \cdot \mu / k)^{1/3} \cdot (\mu / \mu_w)^{0.14}$	$k_{\text{vidrio}} = 0.465$ BTU/hpie <sup>2</sup> ·°F/pie $D_j = 0.82$ pie $C_p = 1$ BTU/lb <sup>0</sup> F $(\mu / \mu_w)^{0.14} = 1$ $\mu = 0.823$ lb/pie h $j = 740$	507.54 BTU/hpi e <sup>2</sup> ·°F	Kern
Coeficiente total de transferencia de calor limpio	$U_c = h_j \cdot h_{oi} / (h_j + h_{oi})$	$h_{oi} = 264.18$ BTU/hpie <sup>2</sup> ·°F	173.75 BTU/hpi e <sup>2</sup> ·°F 836.63 kCal/hm <sup>2</sup> ·°C	Kern
Coeficiente total de transferencia de calor sucio	$U_D = U_c \cdot h_d / (U_c + h_d)$	$R_d = 0.001$ $h_d = 1/R_d$	712.78 kCal/hm <sup>2</sup> ·°C	Kern
Diferencia de temperatura verdadera	$\Delta T_v = \text{MLDT}$	$\Delta T_1 = 58^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_2 = 2^{\circ}\text{C}$	18.7 <sup>0</sup> C	
Area de transferencia de calor	$A_{tc} = Q / U_D \cdot \Delta T_v$		0.04 m <sup>2</sup>	Kern

Nota: Como el área física es mayor que el área de transferencia de calor, se justifica la colocación de la chaqueta.

Atendiendo a que en el proceso de decoloración de la cera dura se utilizan sustancias muy agresivas a una temperatura relativamente alta (85<sup>0</sup>C), se propone que el reactor sea de vidrio termorresistente (fluorsilicatos). El agitador, como también va a estar en contacto con este medio se recomienda que sea de TEFLON.

## **CONCLUSIONES:**

1. Se comprobó experimentalmente que todas las soluciones acuosas que se utilizan en las etapas de decoloración y lavado de la cera, pueden separarse de esta por enfriamiento de la mezcla, solidificando perfectamente la cera en la parte superior, dada su insolubilidad en el medio acuoso.
2. Queda demostrado que la velocidad de agitación en el proceso tiene que ser menor que 150 rpm para evitar así la formación de emulsiones.
3. Los resultados obtenidos cuando el proceso de decoloración se desarrolla a escala de 2 litros utilizando las condiciones de operación que se obtuvieron de los modelos matemáticos a escala de laboratorio, son similares y satisfactorios, por lo que permiten desarrollar el escalado del proceso.
4. Es factible escalar el proceso de decoloración de la cera dura por vía química para obtener una producción de 1 kg diario de cera decolorada a un costo de producción de 8 552.32 \$/año obteniéndose una ganancia de 2 767.6 \$/año, que permite la recuperación de la inversión en un período de 4 años.
5. En la producción de 1 kg de cera decolorada se generan aproximadamente 0.05 metros cúbicos de residuales que poseen una cantidad de 2.4 mg/l de cloruros y un pH cercano a cero, que puede ser neutralizado con hidróxido de calcio para formar un precipitado de sulfato de calcio el cual puede ser usado en otros renglones.
6. El proceso de decoloración de la cera dura con hipoclorito de sodio en medio ácido comprende las etapas de:
  - fusión y decoloración de la cera dura
  - enfriamiento y separación de la cera decolorada
  - fusión y lavado de la cera decolorada con una solución de ácido clorhídrico 0.1 N
  - enfriamiento y separación de la cera decolorada y lavada
  - fusión y lavado de la cera decolorada con agua limpia
  - enfriamiento y separación de las aguas de lavado

## BIBLIOGRAFIA

1. Aiba, Shuichi. Biochemical engineering./ Shuichi Aiba, Arthur E. Humphrey, Nancy F. Millis. New York, Academic Press, 1965. 333 p.
2. Bissio, Attilio. Scaleup of chemical processes : conversion from laboratory scale test to successful commercial size desing./ Attilio Bissio, Robert L. Kabel. - - New York : Wiley-Interscience, 1985. 698 p.
3. Cañizares Domínguez, Tania. Aplicación del análisis de proceso al escaldo del reactor G-0./ Tania Cañizares Domínguez.- - TGC; UCLV; 1997.
4. Davison, B.K.,Wiggins, L.F.. La Refinación de la Cera de Caña. International Sugar J. 55 : 1953.
5. González Mesa, Dianetsy. Estudio del proceso de decoloración de la cera dura por vía química.- - TD; UCLV (Qca-Fcia); 1997.
6. Ju, L. K., Chase, G. G.. Improve scaleup strategies of bioreactors. Bioprocess Engineering Journal. 8: 49-53: 1992.
7. Ulrich, G. D.. Diseño y economía de los procesos de Ingeniería Química./ G. D. Ulrich.- -Mc. Graw-Hill Iberoamericana, 1985.

