



CENTRO DE INFORMACION  
CIENTIFICA Y HUMANISTICA

3 MAR 1989

# SELECCION DE AGITADORES.

## PROGRAMA SELAGI (VERSION 1.0)

RAUL SABADI\* Y GUSTAVO SAURA\*

\* INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIONES DE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZUCAR (ICIDCA)

### Resumen

La selección de agitadores es una tarea usual en la industria química y tiene en cuenta las características geométricas del recipiente y las características físicas del líquido para garantizar un grado de mezclado adecuado. En este trabajo se presenta el programa *SELAGI (versión 1.0)*, diseñado para el cálculo del consumo de potencia en agitación.

### Abstract

To select a mixer is a common task in the chemical industry. It is done taking into account the geometric characteristics of the vessel and the physical characteristics of the fluid, in order to achieve the adequate degree of mixing. In this paper the computer program *SELAGI (version 1.0)*, designed for calculations of power requirements in mixing, is presented.

### Introducción

En la industria química la selección de agitadores para diferentes condiciones de operación es una tarea usual. Esta selección tiene en cuenta las características geométricas del recipiente y las características físicas del líquido, y tiene como objetivo garantizar un grado de mezclado adecuado.

En la selección del agitador se utilizan nomogramas y curvas reportadas en la literatura para diferentes tipos de agitadores y condiciones de mezclado. Uno de los criterios utilizados comúnmente es el análisis del consumo de potencia de los agitadores que garantizan el mezclado requerido. Mucha de la energía mecánica empleada puede perderse si se selecciona un tipo no adecuado de agitador para lograr el resultado deseado en el proceso.

En el ICIDCA se trabaja en el diseño de reactores que, en muchos casos, requieren agitación mecánica y se consideró oportuno el diseño e implementación de

un programa de computación que facilite esta tarea.

Con este fin se acometió la tarea de desarrollar el programa *SELAGI (versión 1.0)*, basado en las metodicas de cálculo del libro *Problemas y Ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química*, de K. F. Pavlov, P. G. Romankov y A. A. Noskov.

### Agitación en un medio líquido

#### ASPECTOS TEORICOS

El mezclado es, quizás, la más universal de todas las operaciones en la industria química. La transferencia de masa y energía son influidas por el mezclado, que puede definirse como *el entremezclado de dos o más porciones diferentes de un material resultante en la obtención de un nivel deseado de uniformidad, física o química, en el producto final*<sup>6</sup>.

Los gases contenidos en un recipiente se mezclan por difusión molecular natural. En los líquidos, sin embargo, la difusión es usualmente un proceso lento. Para acelerarlo se utilizan los agitadores mecánicos por lo que podemos referirnos al mezclado de líquidos como *una difusión forzada en una masa de líquido contenida en un recipiente*<sup>2</sup>. La rotación de un agitador en esta masa de líquido produce corrientes de alta velocidad que se mueven a través del recipiente. Cuando estas corrientes se ponen en contacto con líquido estancado o en corrientes lentas, ocurre la transferencia de momento, siendo arrastradas estas corrientes más lentas, lo que provoca la difusión forzada y el mezclado de los líquidos.

El grado de mezclado depende de la turbulencia formada y de las fuerzas que tienden a evitar la formación de esta. Se alcanza un alto grado de mezclado cuando la masa de líquido se encuentra en condiciones de flujo turbulento.

### Consumo de potencia

La energía mecánica requerida para extender la turbulencia en el líquido es función de la geometría del recipiente y del agitador y de las propiedades físicas del líquido. A medida que la viscosidad del líquido es mayor, se requiere una mayor energía para vencer la resistencia al flujo. Rushon, Costich y Everett usaron el análisis dimensional para estudiar los factores que influyen en el consumo de potencia para agitación de líquidos encontrando que:

$$K_N = f(\text{Re}, \text{Fr}, \text{Cd}, \text{Cb}, \text{CHo}, \dots) \quad (1)$$

$$\text{Rec} = \frac{\text{Ind}^2}{u} \quad (2)$$

$$\text{Frc} = \frac{n^2 d}{g} \quad (3)$$

$$K_N = \frac{N}{\text{In}^3 d^5} \quad (4)$$

$K_N$ : criterio de potencia (o número de potencia,  $N_p$ )

$\text{Rec}$ : número de Reynolds (centrífugo)

$\text{Frc}$ : número de Froude (centrífugo)

$\text{Cd}$ ,  $\text{Cb}$ ,  $\text{C}_{\text{HO}}$ , ...: criterios de semejanza geométrica que caracterizan la construcción del agitador, la influencia de la altura del líquido y otros factores geométricos.

$l$ : densidad del líquido

$u$ : coeficiente dinámico de viscosidad

$n$ : frecuencia de rotación del agitador

$g$ :  $9.81 \text{ m/s}^2$ , aceleración de la gravedad

$D$ : diámetro del recipiente

$b$ : ancho de la paleta del agitador

$H_0$ : altura de la capa de líquido

Para los aparatos geoméricamente semejantes la ecuación 4 adquiere la forma:

$$K_N = \frac{c}{\text{Rec}^m} \quad (5)$$

donde:

$c, m$ : magnitudes constantes para la estructura dada del agitador y el régimen de mezclado.

Los valores de  $c$  y  $m$  aparecen reportados para distintos agitadores (tabla 1)<sup>3</sup>. En la figura 1 se da la dependencia entre el criterio de potencia y el número de Reynolds.

### Programa SELAGI (versión 1.0)

#### Objetivos y aspectos teóricos

El programa SELAGI se diseña con dos objetivos fundamentales:

- Cálculo de la potencia consumida por el agitador.
- Determinación de la geometría del agitador, dada una restricción en el consumo de potencia.

La versión 1.0 del programa contempla el cumplimiento del primer objetivo, con este propósito se implementan dos opciones:

- Selección de una variante de agitación definida.
- Definición de una nueva variante de agitación.

En el primer caso fueron modeladas estadísticamente las curvas de la fig. 1 que representan el criterio de potencia para 29 variantes de agitación en función del  $\text{Rec}$ .

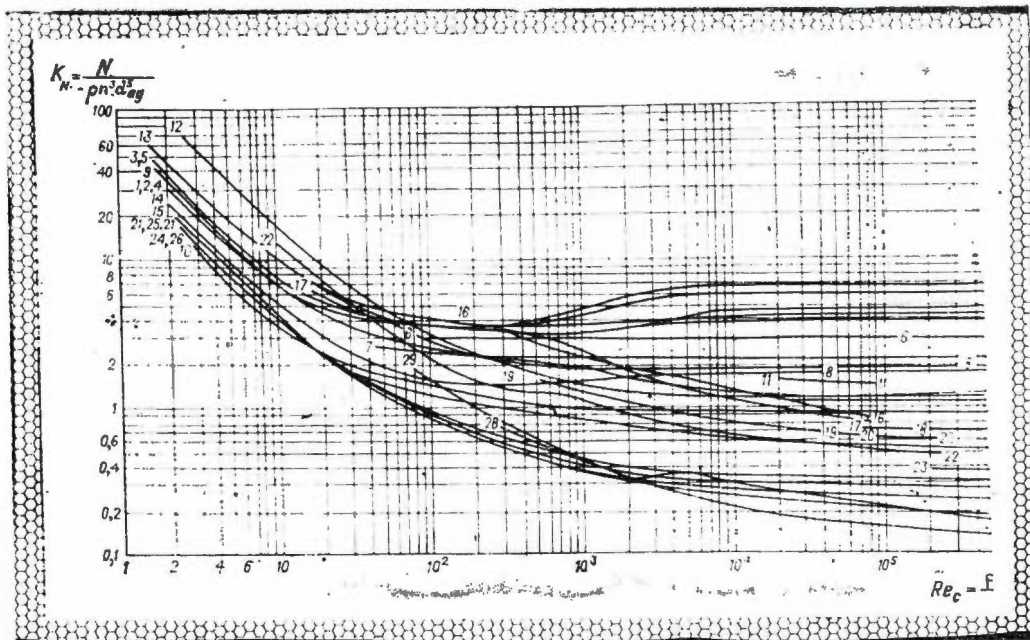
En el segundo caso se implementa un módulo de definición de la variante basado en la tabla 1 y se calcula el criterio de potencia según la ecuación 5.

La potencia consumida por el agitador en régimen estacionario se calcula por la ecuación:

$$Nop = KN \text{In}^3 d^5 \quad (6)$$

La potencia en el momento de arranque es habitualmente de 2 a 3 veces mayor que la de operación y se calcula como:

$$Narr = Ka Nop \quad 2 < Ka < 3 \quad (7)$$



El criterio de potencia en función del criterio de Reynolds 1, agitador de turbina abierto con seis paletas verticales rectas ( $b = 0,20d_{ag}$ ,  $l = 0,25d_{ag}$ ) para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente con cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,17$ ); 2, agitador de turbina tipo 1 para  $B/d_{ag} = 0,10$ ; 3, agitador de turbina abierto con seis paletas verticales curvas  $b = 0,20 d_{ag}$ ,  $l = 0,25 d_{ag}$ ,  $1 = 0,25 d_{ag}$ ) para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente con cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,10$ ); 4, agitador de turbina tipo 1 para  $B/d_{ag} = 0,04$ ; 5, agitador de turbina abierto con seis paletas en forma de flecha ( $b = 0,20 d_{ag}$ ),  $l = 0,25 d_{ag}$ ) para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente con cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,10$ ); 6, agitador unilateral radial de disco con seis paletas verticales rectas ( $b = 0,10 d_{ag}$ ,  $l = 0,35 d_{ag}$ ) situadas debajo del disco para  $D/d_{ag} = 2,5$  en un recipiente con cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,25$ ); 7, agitador de turbina radial con dieciséis paletas y estator en un recipiente sin tabiques; 8, agitador de dos paletas con paletas verticales rectas ( $b = 0,25 d_{ag}$ ) para  $D/d_{ag} = 4,35$  en un recipiente con tres tabiques ( $B/d_{ag} = 0,11$ ); 9, agitador de ocho paletas rectas ( $b = 0,25 d_{ag}$ ) formando un ángulo de  $45^\circ$  para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente de cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,10$ ); 10, agitador de dos paletas tipo 8 para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente de cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,10$ ); 11, agitador de turbina cerrado de seis paletas con estator para  $D/d_{ag} = 2,4$  en un recipiente sin tabiques; 12, agitador de turbina similar al tipo 11, para  $D/d = 3$  en un recipiente sin tabiques; 13, agitador tipo 12, pero sin estator para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente con cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,10$ ); 14, agitador de turbina tipo 1 en un recipiente sin tabiques; 15, agitador de hélice de tres paletas,  $s = 2 d_{ag}$  para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente con cuatro tabiques ( $B/d_{ag} = 0,10$ ); 16, agitador de cuatro paletas tipo 8 para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente sin tabiques; 17, agitador de cuatro paletas, éstas ( $b = 0,025 d_{ag}$ ) formando un ángulo de  $60^\circ$ , para  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente sin tabiques; 18, agitador de hélice de tres paletas tipo 15, pero siendo  $s = 1,33 d_{ag} = 16$  en un recipiente con tres tabiques ( $B/d_{ag} = 0,06$ ); 19, agitador de cuatro paletas tipo 9 para  $D/d_{ag} = 5,2$  en un recipiente sin tabiques; 20, agitador de dos paletas tipo 8 para  $D/d_{ag} = 3$  en recipiente sin tabiques; 21, agitador de hélice de tres paletas tipo 15 para  $D/d_{ag} = 3,3$  en un recipiente sin tabiques; 22, agitador de cuatro paletas tipo 9 (el mismo que el 19) para  $D/d_{ag} = 2,4 \dots 3,0$  en un recipiente sin tabiques; 23, agitador de hélice de tres paletas tipo 15 siendo  $s = 1,09 d_{ag}$  y  $D/d_{ag} = 9,6$  en un recipiente con tres tabiques ( $B/d_{ag} = 0,06$ ); 24, lo mismo siendo  $s = d_{ag}$  y  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente con 4 tabiques ( $B/d_{ag} = 0,10$ ); 25, lo mismo para  $s = 1,04 d_{ag}$  y  $D/d_{ag} = 4,5$  en un recipiente sin tabiques; 26, lo mismo en caso de  $s = d_{ag}$  y  $D/d_{ag} = 3$  en un recipiente sin tabiques; 27, lo mismo siendo  $s = 1,05 d_{ag}$  y  $D/d_{ag} = 2,7$  en un recipiente sin tabiques; 28, lo mismo para  $s = d_{ag}$  y  $D/d_{ag} = 3,8$  en un recipiente sin tabiques; 29, agitador de dos paletas tipo 8, con paletas estrechas ( $b = (0,13 \dots 0,17) d_{ag}$ ) para  $D/d_{ag} = 1,1$  en un recipiente sin tabiques.

Designaciones adoptadas para caracterizar los agitadores: D, diámetro del recipiente;  $d_{ag}$ , diámetro del agitador; b, ancho de la paleta del agitador; l, longitud de la paleta; B, ancho del tabique; s, paso del agitador de hélice.

Para determinar la potencia instalada se considera que el rendimiento del motor junto con la transmisión es igual a 0,95 y una reserva de potencia del 20%.

### Descripción del programa

$$N_{inst} = \frac{1,2 N_{arr}}{0,95} \quad (8)$$

El programa está implementado en lenguaje BASICA, sobre sistema operativo MS

DOS, y se ha diseñado para facilitar el trabajo al usuario en forma interactiva con la computadora.

La ejecución se inicia con el comando SELAGI. Después de la pantalla de presentación, se relacionan los objetivos del programa y a continuación se describe la nomenclatura empleada. Ahora deben suministrarse los datos al programa, para lo cual el usuario puede escoger entre los sistemas Internacional o Inglés de unidades. En cualquier caso se indican las uni-

dades para cada uno de los datos, que son:

- Densidad del líquido
- Coeficiente dinámico de viscosidad
- Diámetro del agitador
- Frecuencia de rotación.

Además pueden definirse los datos asociados a la geometría del recipiente. Esta información de entrada es validada para posibilitar la modificación de errores.

Ahora puede seleccionarse la revisión de las opciones de agitación implementadas o la definición de una nueva opción. Una vez seleccionada cualquiera de ellas se ofrece la posibilidad de calcular las relaciones geométricas características, pues estas variantes se definen en función de ellas.

Si fue seleccionada la primera opción, aparecen en 4 pantallas consecutivas las variantes de agitación definidas, es decir, las de la fig. 1. El usuario puede moverse

entre estas pantallas según las indicaciones del menú del borde inferior, que le ofrece las opciones de avanzar, retroceder, consultar la nomenclatura, calcular las relaciones características y, por supuesto, seleccionar la variante que desee. Esto se logra presionando las teclas con la inicial de la opción deseada. Si se decide por la selección debe entonces teclear el número de la variante escogida.

Si no se desea ninguna se pulsa ENTER y se transfiere el control al menú para definir una nueva variante. Esta información al igual que todas las que recibe el programa, es validada de inmediato y de ser correcta, aparecen los resultados en pantalla; estos resultados pueden ser impresos por decisión del usuario. De no desearse la impresión se pueden ejecutar nuevos cálculos.

Si fue seleccionada la opción de definir una nueva variante el usuario puede decidir si va a analizar un agitador de hélice, paletas o turbina de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1. Valores de las constantes c y m

Tipo de agitador	Característica geométrica			Valores de las constantes	
	H/dag	D/dag	h/dag	c	m
De dos paletas	2	2	0,36		
Re < 20				111,0	1,0
Re = 100...5.10 <sup>4</sup>				14,35	0,31
De dos paletas	3	3	0,33	6,8	0,2
De dos paletas inclinadas respecto al eje formando un ángulo de 45°	3	3	0,33	4,05	0,2
De cuatro paletas	3	3	0,33	8,52	0,2
De cuatro paletas inclinadas hacia arriba formando un ángulo de 45°	3	3	0,33	5,05	0,2
De cuatro paletas inclinadas hacia arriba formando un ángulo de 60°	3	3	0,33	6,30	0,18
De dos paletas en forma de ancla	1,11	1,11	0,11	6,2	0,25
De cuatro paletas en forma de ancla (paleta redonda)	1,11	1,11	0,11	6,0	0,25
De hélice de dos paletas con el ángulo de inclinación de 22,5°	3	3	0,33	0,985	0,15
De hélice de tres paletas con eje inclinado	3,5	3,8	1		
Re < 30				230,0	1,67
Re < 3.10 <sup>3</sup>				4,63	0,35
Re > 3.10 <sup>3</sup>				1,19	0,15
De turbina de tres paletas con orificio de entrada de 37 mm	3	3	0,33	3,9	0,2
De turbina de seis paletas con aparato guía	1,78	2,4	0,25	5,98	0,15

En cada caso se cumple lo explicado para las variantes definidas en cuanto a opciones y validación de la información de entrada. Una vez definida la variante correcta pueden imprimirse los resultados de manera similar. Los resultados se reflejan en el sistema de unidades seleccionado por el usuario.

A continuación se ofrecen los datos y resultados para un caso particular.

Caso Agitador de 4 paletas inclinadas hacia arriba formando un ángulo de 45 grados ( $H/dag=3$ ,  $D/dag=3$ ,  $h/dag=0,33$ ).

#### *Datos del agitador*

Diámetro	0,80 m
Ancho de la paleta	0,16 m
Longitud de la paleta	0,20 m
Frecuencia de rotación	3,00 r.p.s.

#### *Datos del tanque*

Diámetro	2,40 m
----------	--------

#### *Datos del líquido*

Densidad	800,00 Kg/m <sup>3</sup>
Coef. din. viscosidad	0,03 Pa.s

#### *Relaciones características*

$b/dag = 0,20$
$L/dag = 0,25$

$$D/dag = 3,00$$

$$B/dag = 0,18$$

#### *Resultados*

Número de Reynolds	: 51200,00
Criterio de potencia	: 0,58
Potencia de operación	: 4086,403 watt
Potencia de arranque	: 8172,896 watt
Potencia instalada	: 10323,550 watt

#### **Conclusiones**

La implementación de este programa ha permitido el cálculo rápido y eficiente del consumo de potencia para diferentes condiciones de agitación. Por la importancia que esto tiene en la industria química, se considera necesario complementar este trabajo con otras posibilidades de agitación y desarrollar otros algoritmos vinculados que permitan la selección y diseño mecánico de agitadores.

#### **Bibliografía**

1. Holland, F. A.; Chapman. Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks.
2. Parker, N. H. *Chem-Eng.*, vol 71. no. 12, 1964.
3. Pavlov, K. F.; Romankov, P. G.; Noskov, A. A. Problemas y Ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química.
4. Guillen, C. S. *Chem. Eng.*, vol. 61, no. 6, 1954.