

CAPÍTULO 10

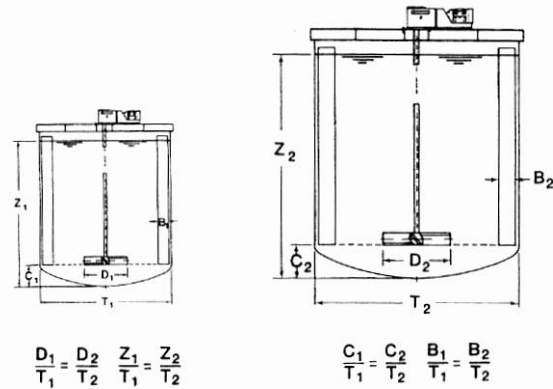
ESCALAMIENTO

La intención de realizar escalamientos de diversos procesos como el de mezclado, es el de controlar parámetros fundamentales a escala piloto con condiciones ideales, para poderlos llevar a cabo a escala real. Sin embargo, los comportamientos obtenidos a escala piloto no siempre son obtenidos de la misma manera en escala real, por lo que muy a menudo es necesario adaptar el proceso con la intención de asegurar el buen funcionamiento del mismo a escala real. De esta manera, son propuestas diversas formas con las cuales es posible lograr un escalamiento de forma eficiente.

10.1 Semejanza Geométrica

Escalar un proceso de cualquier índole siempre es algo complicado, sin embargo existen formas o vías por las cuales es posible llegar al objetivo deseado, que es lograr con éxito que un proceso realizado a escala piloto sea reproducido con los mismos resultados a una escala real. Así, obtenemos una semejanza geométrica cuando todas las dimensiones características del proceso a escalar son similares y que además cuenta con constantes de proporcionalidad; es decir, debe existir una semejanza entre las dimensiones del tanque modelo y el tanque prototipo, impulsor modelo e impulsor prototipo, tal como se muestra en la figura 10.1. (McDonough, 1992).

Figura 10.1. Ejemplo de semejanza geométrica, tanto el modelo como el prototipo guardan una similitud en forma y dimensiones.



Fuente: Uhl et al., 1986.

También se tiene una semejanza geométrica cuando, además, entre dos sistemas existe una semejanza cinética y ocurre cuando los patrones de flujo en ambos sistemas son semejantes; es decir, cuando los patrones de movimiento son semejantes y la proporción de velocidades son iguales, es entonces cuando se dice que los sistemas son cinemáticamente semejantes. (Uhl et al., 1986).

De la misma manera, existe semejanza dinámica cuando todas las proporciones de fuerza son constantes; tal es el caso del número de Reynolds (N_{Re}), número de potencia (N_P), número de flujo (N_Q), entre otros. (McDonough, 1992).

10.2 Número de Reynolds

El número de Reynolds se encarga de describir el movimiento característico del líquido en el tanque de agitación, y está en función de la velocidad generada por el impulsor, de la viscosidad dinámica del líquido, la densidad de la mezcla y del diámetro del impulsor.

$$N_{\text{Re}} = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

De donde:

ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)

N = Velocidad del impulsor (rps)

D^2 = Diámetro del Impulsor (m)

μ = Viscosidad Dinámica del Fluido ($kg/m \cdot s$)

10.3 Número de Potencia

Este número adimensional se encarga de establecer la relación existente entre el consumo de potencia generado por el impulsor, la densidad del líquido, la velocidad de rotación del impulsor y su diámetro. Es decir, es la razón de fuerzas externas implicadas en la agitación a fuerzas inerciales por unidad de volumen del fluido. Este número

adimensional es resultado del esfuerzo necesario del impulsor para contrarrestar la fricción generada entre el fluido en movimiento y las paredes y el fondo del tanque de agitación, así también por la resistencia misma producida por los deflectores radiales.

El número de potencia se obtiene desarrollando la siguiente fórmula:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

De donde:

P = Potencia de Agitación del Impulsor (watts)

ρ = Densidad del Fluido (kg/m^3)

N = Velocidad del Impulsor (rps)

D = Diámetro del Impulsor (m)

10.4 Número de flujo del impulsor

Siempre que una potencia es aplicada al sistema de mezclado, se genera una capacidad de distribución de fluido; es decir, una capacidad de bombeo o caudal (Q), de la misma manera es generada una carga (H).

$$Q \propto N \cdot D^3$$

$$H \propto N^2 \cdot D^2$$

De donde Q representa el flujo interno en el sistema y H el esfuerzo cortante en el mezclado. La energía cinética en el sistema es proporcionado por la carga H , generando un corte a través del impulsor, este corte generado por la carga a la vez es disipado en una turbulencia.

$$Q = N_Q \cdot N \cdot D^3$$

Por lo tanto, la capacidad de bombeo es el flujo generado por el impulsor, por ende, el total de material descargado o puesto en movimiento por el impulsor. De esta forma al igual que el número de potencia y número de Reynolds, los valores del número de flujo o de bombeo bajo condiciones de flujo turbulento son conocidos dependiendo el impulsor empleado.

$$N_Q = \frac{Q}{N \cdot D^3}$$

En la tabla 10.1, se muestran los valores del N_Q para impulsores comúnmente usados, dichos valores se encuentran entre 0.4 y 0.8 (Paul et al., 2003).

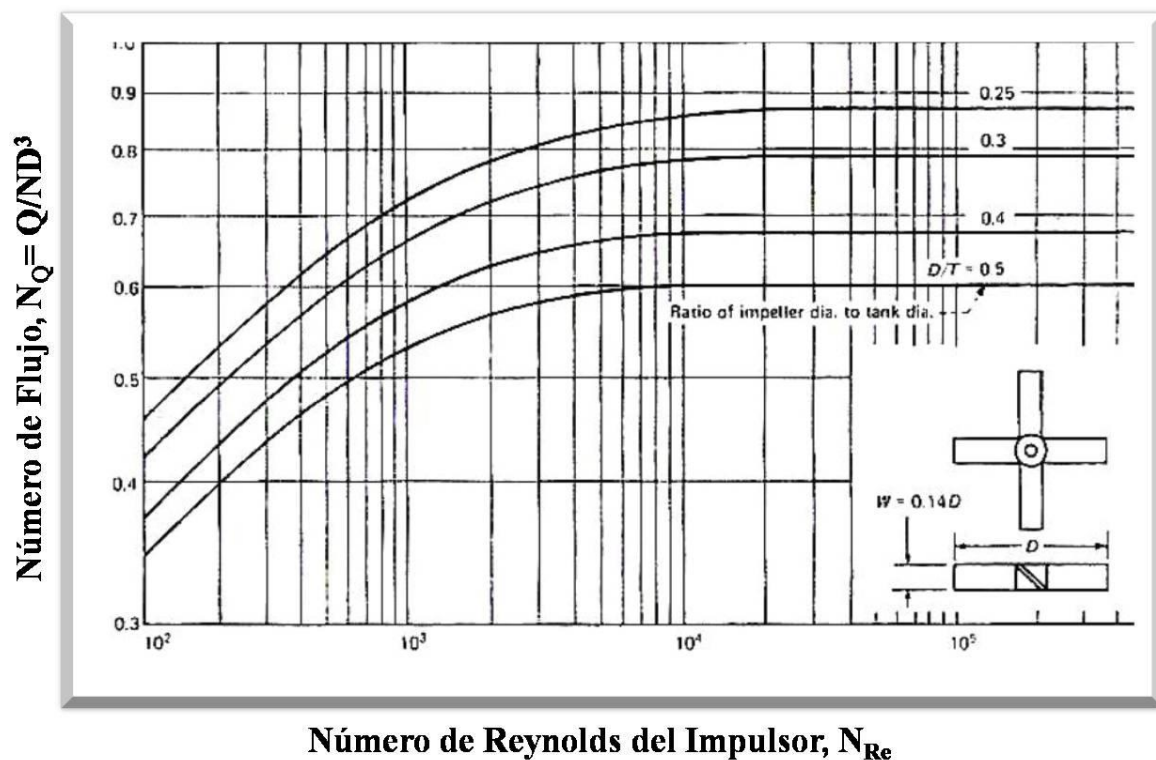
Tabla 10.1. Valores de N_Q para impulsores usados con más frecuencia en procesos de mezclado.

Tipo de Impulsor	Número de Bombeo (N_Q)
Propela Marina	0.4 - 0.6
Turbina de Paletas Inclinas	0.79
Impulsor tipo Hydrofoil	0.55 - 0.73
Impulsor de Hojas Curvas	0.3
Turbina de Paletas Planas	0.7
Turbina de Disco y Hojas Planas (Rushton)	0.72
Turbina de Hojas Cóncavas (Rushton)	0.76

Fuente: Paul et al., 2003.

Conociendo el N_Q de cada uno de los impulsores más empleados en el proceso de mezclado, su puede también relacionar con el N_{Re} y la relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque de agitación D/T . En la siguiente figura tenemos esta relación para una turbina de paletas inclinadas a 45° .

Figura 10.2. N_{Re} contra N_Q en relación con la razón del diámetro del impulsor y el diámetro del tanque de agitación D/T



Fuente: Uhl et al., 1986.

En la figura 10.2 es notable que cuando incrementa el N_Q , el N_{Re} también se ve afectado, incrementado de la misma manera a un valor Re de 10 000, manteniendo constante llegando a un N_{Re} más alto. Se observa también que aquellos impulsores con diámetros más pequeños son los que generan N_Q más altos, por lo tanto si lo que se desea

es una eficiencia alta de bombeo, estos impulsores no deberán ser sometidos a N_{Re} más bajos de 1000 (Paul et al., 2003).

10.5 Consumo de potencia y energía asociada al proceso como parámetros de escalamiento

De la misma manera que los parámetros adimensionales vistos anteriormente, las energías necesarias y las potencias para cada uno de los procesos de lavado de suelos también pueden ser empleados como parámetros de escalamiento, sobre todo si se están relacionados por unidad de flujo; es decir, tanto potencia (Watts) como energía (kJ) consumida por litro de agua-surfactante necesarios para ejecutar el proceso de lavado de suelos con eficiencia son necesarios para estimar tanto parámetros de escalamiento como costos de ejecución.

En las tablas 10.2 a 10.9 se muestran las pruebas realizadas a suelo contaminado por herbicida 2,4-D (20 mg/kg), se utilizó un surfactante tipo aniónico llamado sodio dodecil sulfato (SDS) a una concentración del 0.5% en relación agua destilada-surfactante. En las tablas se pueden observar los tiempo de ejecución de cada una de las pruebas (min), el consumo de potencia (Watts), consumo de potencia por litro de solución (W/L), la energía asociada al proceso (kJ), la energía asociada por litro de solución (kJ/L) y por último se muestra la eficiencia de remoción del proceso de lavado de suelos.

Tabla 10.2. Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 10% concentración de suelo.

	Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
10% Concentración de Suelo. Velocidad Constante 1400 rpm	15	3	6.667	9.6912	21.537	72.9
	30	2.5	5.556			
	45	2	4.444			
	60	1.5	3.333			
	75	1.5	3.333			
	90	1.5	3.333			

Tabla 10.3. Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 20% concentración de suelo.

	Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
20% Concentración de Suelo. Velocidad Constante 1400 rpm	15	3	6.667	14.941	33.202	64.69
	30	2	4.444			
	45	3	6.667			
	60	3	6.667			
	75	3	6.667			
	90	3	6.667			

Tabla 10.4. Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 30% concentración de suelo.

	Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
30% Concentración de Suelo. Velocidad Constante 1400 rpm	15	3	6.667	14.492	32.205	64.567
	30	2.5	5.556			
	45	2.5	5.556			
	60	2.5	5.556			
	75	2	4.444			
	90	1.5	3.333			

Tabla 10.5. Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 40% concentración de suelo.

	Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
40% Concentración de Suelo. Velocidad Constante 1400 rpm	15	2.5	5.556	13.755	30.567	63.713
	30	2.5	5.556			
	45	4.5	10			
	60	4.5	10			
	75	4.5	10			
	90	4	8.889			

Tabla 10.6. Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1200 rpm.

	Tiempo (min)	Potencia asociada (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
40% Concentración de Suelo. 1200 rpm	15	2	4.444	5.932	13.182	66.773
	30	1.5	3.333			
	45	1	2.222			
	60	1	2.222			
	75	1	2.222			
	90	1	2.222			

Tabla 10.7. Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1400 rpm.

	Tiempo (min)	Potencia asociada (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
1400 rpm, 40% Concentración de Suelo	15	3	6.66666667	14.4921	32.20467	72.0825
	30	3	6.66666667			
	45	3	6.66666667			
	60	3	6.66666667			
	75	2.5	5.55555556			
	90	2.5	5.55555556			

Tabla 10.8. Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1550 rpm.

	Tiempo (min)	Potencia asociada (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
1550 rpm, 40% Concentración de Suelo	15	4.5	10	21.255	47.23333	88.95
	30	4.5	10			
	45	4.5	10			
	60	4	8.88888889			
	75	4	8.88888889			
	90	4	8.88888889			

Tabla 10.9. Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1700 rpm.

	Tiempo (min)	Potencia asociada (Watts)	Potencia por Litro (W/L)	Energía (kJ)	Energía (kJ/L)	Remoción (%)
1700 rpm, 40% Concentración de Suelo	15	7	15.5555556	42	93.33333	76.995
	30	7	15.5555556			
	45	7	15.5555556			
	60	7	15.5555556			
	75	7	15.5555556			
	90	7	15.5555556			

10.6 Velocidad mínima de agitación

Anteriormente ya se había hablado de la velocidad mínima de agitación para lograr lo que comúnmente es llamado “estado apenas suspendido” o “Njs” el cual no es más que la velocidad mínima para lograr que los sólidos presentes en la mezcla permanezcan físicamente suspendidos. El nivel de suspensión dependerá del flujo aplicado en el sistema de agitación; es decir, si se desea una suspensión de tipo completa, homogénea, con formaciones de filetes en esquinas o pequeñas sedimentaciones en el fondo o en algunos casos para lograr una buena dispersión de sólidos flotantes, aquellos sólidos con densidades menores a la del líquido con el que se mezclará.

Para el caso de esta investigación es necesario lograr una suspensión de tipo completa, en la cual todas las partículas sólidas deberán permanecer en movimiento y ninguna de ellas podrá permanecer en la base del tanque de agitación por más de 1 o 2 segundos. Debido a esto se hicieron pruebas de lavado variando las concentraciones de suelo, probando velocidades variadas de agitación y mediante la observación del tanque de agitación se obtuvieron las velocidades mínimas para mantener los sólidos en suspensión.

A continuación, en la tabla 10.10 se muestra la relación de las velocidades mínimas de agitación observadas.

Tabla 10.10. Velocidades mínimas de agitación observadas con variaciones de concentración de suelo.

Relación de Njs observada	
Concentración de Sólidos	Njs (rpm)
10%	657
20%	838
30%	904
40%	906

Teniendo una idea de las velocidades mínimas a las cuales el sistema de lavado de suelos contaminados logrará obtener una suspensión de sólidos de tipo completa. Se procedió a realizar los cálculos teóricos de las velocidades mínimas de agitación para contrastarlos con los datos obtenidos mediante la simple observación y así compararlos con las velocidades de lavado empleadas en esta investigación para determinar si está realizando o no una suspensión de sólidos de tipo completa.

Para lo anterior se desarrolló un modelo de cálculo de velocidades mínimas de agitación cumpliendo con las características físicas del sistema de lavado, como lo son el régimen de flujo (“de ocho” o “doble ocho”), la relación entre los diámetros del tanque y del impulsor, la distancia que existe entre el impulsor y el fondo del tanque de agitación, etc.

El modelo en el cual se apoyó esta investigación fue en la ecuación de correlación para predecir la velocidad mínima de agitación para una completa suspensión de sólidos en un vaso de agitación.

$$Njs = 3.06 \left(\frac{T}{D} \right) \left[1.33 \cdot e^{\left(\frac{0.44 Cb}{T} \right)} \right] \cdot D^{-0.63} \cdot X^{0.13} \cdot dp^{0.20} \cdot \nu^{0.1} \cdot \left(\frac{g \cdot \Delta p}{\rho L} \right)^{0.45}$$

Ecuación de correlación para predecir la velocidad mínima de agitación para una completa suspensión de sólidos en un vaso de agitación (Armenante et al., 1998.)

De donde:

Tabla 10.11. Nomenclaturas necesarias para desarrollar la fórmula de correlación para predecir la velocidad mínima de agitación.

T=	Diámetro del tanque; m.	0.1 m.
D=	Diámetro del impulsor; m.	0.05 m.
X=	Porcentaje de peso en sólidos; g/g x 100	10% al 40%
dp=	Tamaño de partícula; m.	0.00025 m.
ν=	Viscosidad cinemática del líquido; m ² /s	0.000001 m ² /s
g=	Constante de gravedad; 9.81 m/s ²	9.81 m ² /s
Δp=	Diferencia de densidades sólido-líquido, (ρs-ρL); kg/m ³	1569 kg/m ³
ρL=	Densidad de líquido; kg/m ³	1000 kg/m ³
Njs=	Velocidad mínima de agitación, s ⁻¹ ; 1 rpm.	0.104719755 s ⁻¹

Teniendo ya bien definidos los datos necesarios para desarrollar la ecuación de velocidad mínima de agitación, se muestra la siguiente tabla (10.12) con los resultados obtenidos de acuerdo a la fórmula de la ecuación antes mencionada.

Tabla 10.12. Velocidades mínimas de agitación de acuerdo a la concentración de suelo, obtenidas mediante la ecuación de Armenante.

Njs Teórico			
Concentración de Sólidos	Njs (s⁻¹)	Njs (rpm)	≈Njs (rpm)
10%	14.7797	141.136	142
20%	16.1734	154.444	155
30%	17.0487	162	162
40%	17.6984	169.007	169

La diferencia entre los valores obtenidos empíricamente y los obtenidos de manera teórica es sin duda muy grande. Esto no quiere decir que la fórmula empleada no sea la correcta, sino que simplemente los modelos de desarrollados para predecir la velocidad mínima de agitación y lograr una completa suspensión de sólidos son probados bajo condiciones ideales; es decir, uniformidad en tamaños y formas de partículas, así como también una uniformidad existente entre densidades (Castillo, 2008). Lo importante es señalar que las velocidades empleadas en el proceso de lavado de suelos contaminados; 1200, 1400, 1550 y 1700 rpm, están muy por encima de las velocidades mínimas de agitación para lograr una suspensión de sólidos de tipo completa.