



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

MÉTODO PARA AMPLIACIÓN DE ESCALA EN ESTANQUES CON AGITACIÓN POR IMPULSORES MECÁNICOS EN SISTEMA DE COAGULACIÓN PARA ÁGUAS DE ABASTECIMIENTO

Fernando Marques Fernandes, Carlos Alberto Amaral Moino, Marlene Silva de Moraes ⁽¹⁾, Ricardo Kenji Oi ⁽²⁾, Luis Renato Bastos Lia ⁽³⁾, Deovaldo de Moraes Júnior ⁽⁴⁾ y Elias Basile Tambourgi ⁽⁵⁾

Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Santa Cecilia
Calle Osvaldo Cruz n° 277 sala 117, Santos, São Paulo, Brasil
Tel. 55-1332027132 - e-mail: fmarques@unisanta.br

^{(1), (3) e (4)} Departamento de Ingeniería Química – Universidad Santa Cecilia

Calle Osvaldo Cruz n° 277, Santos, São Paulo, Brasil - e-mail: bastos@unisanta.br

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería de Producción – Universidad Santa Cecilia

Calle Osvaldo Cruz n° 277, Santos, São Paulo, Brasil - e-mail: fmarques@unisanta.br

⁽⁵⁾ Departamento de Ingeniería de Sistemas Químicos – Universidad Estadual de Campinas
Apartado 6066, Campinas, São Paulo, Brasil - e-mail: eliasm@feq.unicamp.br

RESUMEN

El tratamiento del agua está directamente relacionado con la calidad de vida. La coagulación (o conversión en copos) es una operación fundamental en el proceso del tratamiento del agua en estanques con impulsores mecánicos. Los resultados de los ensayos de bancada en estanques con impulsores mecánicos, mismo cuando realizados con rigor, normalmente no son reproducidos en escala industrial en función de la falta de una técnica adecuada de ampliación de escala.

Este trabajo tiene por objetivo proponer un método para ampliación de escala (scale-up), de estanques con agitación mecánica conteniendo sólidos en suspensión, con aplicación en sistemas de coagulación para tratamiento del agua.

Fueron empleadas una unidad de bancada con capacidad de 1,5 litros y dos unidades piloto con 9 litros y 48 litros, con dimensiones normalizadas por Rushton.

Estas unidades estaban compuestas de un estanque cilíndrico equipado con chicanas y la agitación efectuada por medio de impulsores mecánicos tipo turbina de 6 palas llanas acoplados a motores de rotación variable. La potencia experimental fue obtenida por la lectura de la rotación del eje y la medición de la fuerza en estanque en balancín para la escala de 1,5 litros y en el motor en balancín por rodamientos para las demás escalas.

Las variables estudiadas fueron: la rotación, el tipo de impulsor, el pH y la concentración del disolvente. Fueron estudiadas cinco técnicas de ampliación de escala: igual potencia por unidad de volumen, igual velocidad en la punta del impulsor, igual tiempo de mezcla, igual capacidad de bombeo y igual número de Reynolds.

Se comprobó que el mejor resultado obtenido en los experimentos fue el de la técnica igual número de Reynolds por permitir operar con menor rotación.

Palabras Claves: coagulación, impulsores mecánicos, ampliación de escala

1. INTRODUCCIÓN

La reducción de la cualidad del agua, es función del crecimiento poblacional desordenado y de un consumo inadecuado por parte de los seres humanos.

De acuerdo con investigaciones realizadas por la ONU, si los patrones del consumo se mantienen, dos de cada tres personas sufrirán con la falta del agua, en números se traduce así, casi dos mil millones y setecientos millones de personas en el mundo. Con vistas a esta preocupación, Brasil ya ha ultrapasado mil Estaciones de Tratamiento del agua, estando algunas de ellas entre las más grandes del mundo [1].

La disponibilidad del agua dulce en la naturaleza está limitada por el alto coste de su obtención en las formas menos convencionales, como es el caso del agua del mar y de las aguas subterráneas. Por lo tanto se debe dar prioridad a la preservación, control y a la utilización del agua dulce superficial.

Están aplicándose técnicas de tratamiento del agua con el intuito de alcanzarse una mejor eficiencia, bajo coste, alta capacidad de producción y óptima cualidad para el consumo.

La coagulación es el agrupamiento de las partículas, utilizándose agitadores electromecánicos y chicanes.

La formación de los copos ocurre cuando se emplea una dosis adecuada de coagulante, que sufre alteración por el PH y otros factores. Es importante resaltar que, para que haya formación de copos, aumento de la densidad y reducción del tiempo de sedimentación, este proceso requiere una mezcla lenta para que no haya el rompimiento de las partículas ya formadas. La optimización de las técnicas de ampliación de escala en estanques que contengan sólidos en suspensión, caso del sistema de coagulación en Estaciones de Tratamiento del agua, es de gran importancia para obtenerse el tan deseado desarrollo sustentable (ambiental, social y económico). La ejecución sistemática del ensayo de coagulación garantiza la confianza de los resultados obtenidos y permite tomar decisiones con seguridad.

La óptima condición de coagulación está relacionada con algunas variables interdependientes, sin embargo, no se puede precisar la manera como eso ocurrirá. Desde los testes de bancada, se determinan las dosis de los productos químicos de tratamiento en las condiciones existentes.

Este trabajo tiene por objetivo proponer un método de ampliación de escala (scale-up) de estanques con agitación mecánica conteniendo sólidos en suspensión, con ampliación en sistemas de coagulación para tratamiento del agua.

2. GRADUACIÓN DE VELOCIDAD

La coagulación es comúnmente realizada en dos etapas que se denominan mezcla rápida y mezcla lenta.

El concepto de graduación de velocidad, aplicado particularmente a las operaciones unitarias, tuvo origen en las primeras teorías sobre la conjunción de partículas, donde se demostró que la tasa de colisión entre partículas es resultado del movimiento del fluido y por consiguiente, controlable [1].

La graduación de velocidad obtenida del análisis de un elemento de fluido se resume en la ecuación (1)

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (1)$$

en que:

P es la potencia (W)

μ es la viscosidad dinámica (kg/m.s)

V es el volumen (m³)

3. TÉCNICAS DE AMPLIACIÓN DE ESCALA

Fueron estudiadas cinco técnicas de ampliación de escala: igual potencia por unidad de volumen, igual velocidad en la punta del impulsor, igual tiempo de mezcla, igual capacidad de bombeo e igual número de Reynolds, segundo [3].

3.1. Igual Potencia por Unidad de Volumen

$$n_2 = n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\left(\frac{2}{3} \right)} \quad (2)$$

siendo:

n_1 la rotación del estanque de escala de Bancada (rpm)

n_2 la rotación del estanque de escala Piloto (rpm)

D_1 el diámetro del impulsor en la escala de Bancada (mm)

D_2 el diámetro del impulsor en la escala Piloto (mm)

3.2. Igual Velocidad en la Punta del Impulsor (v_{tip})

$$n_2 = n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \quad (3)$$

3.3. Igual Tiempo de Mezcla (t_m)

$$n_2 = n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\left(\frac{1}{4} \right)} \quad (4)$$

3.4. Igual Capacidad de Bombeo (F_L/V)

$$n_2 = n_1 \quad (5)$$

3.5. Igual Número de Reynolds (N_{Re})

$$n_2 = n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (6)$$

4.0 MATERIALES Y MÉTODO

4.1 Equipamientos Utilizados

Los testes de coagulación para sedimentación de sólidos en suspensión fueron realizados en un estanque en la escala de bancada Figura 1. Este estanque posee: diámetro de 124 mm, altura útil de 124 mm (altura total de 229 mm), volumen aproximado de 1,5 l, 4 placas deflectoras verticales con 12,4 mm de anchura, impulsor movido por un motor eléctrico con rotación variable de 1/7 HP. El impulsor empleado es de flujo radial con 6 palas llanas de acuerdo con la Figura 1.



Figura 1: Escala de bancada ($V = 1,5 \ell$), estanque en balancín sobre rodamientos para el cálculo de la potencia

La fuerza centrífuga causada por la agitación fue medida desde la base en balancín, dotada de un brazo de 174 mm y atada a un dinamómetro. Para el aumento de escala (*scale-up*) de los valores determinados en el estanque de escala de bancada fueron usados dos estanques de escala piloto, el primero con altura útil y diámetro de 226 mm, volumen de aproximadamente 9 ℓ , dotado con 4 placas deflectoras verticales de 22,6 mm de anchura. Fue utilizado igual tipo de impulsor y motor eléctrico con rotación variable de 1/2 HP, Figura 2. El impulsor fue, como en el estanque de 1,5 ℓ , una turbina con 6 palas llanas.

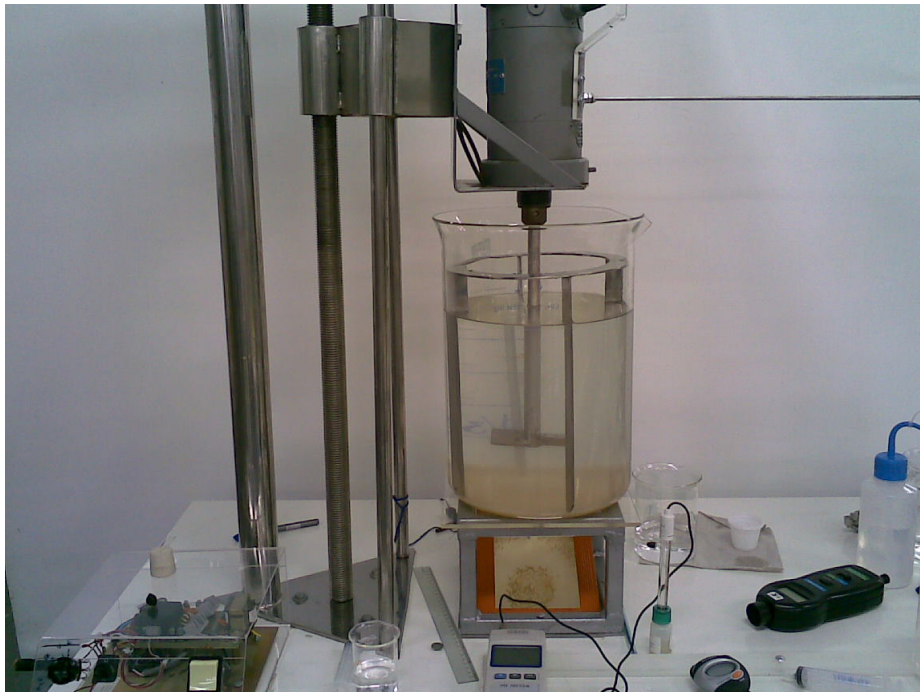


Figura 2: Escala piloto ($V = 9 \ell$), motor en balancín sobre rodamientos con control de rotación

El segundo estanque para ampliación de escala posee altura útil y diámetro de 394 mm, volumen aproximado de 48 ℓ, dotado con 4 placas deflectoras verticales con 39,4 mm de anchura. Fue utilizado igual tipo de impulsor y motor eléctrico con 3 HP accionado por un inversor de frecuencia, Figura 3. En la carcasa se fijó un brazo para el cálculo de la potencia consumida en el eje.



Figura 3: Escala piloto ($V = 48 \ell$), motor en balancín sobre rodamientos activado por inversor de frecuencia.

Las dimensiones de los estanques y de los impulsores siguen el método de Rushton [4], que tiene relación entre el diámetro del estanque y la altura, entre la posición y el diámetro del impulsor, diámetro y altura de las palas del impulsor y diámetro de las chicanas, de acuerdo con la Figura 4.

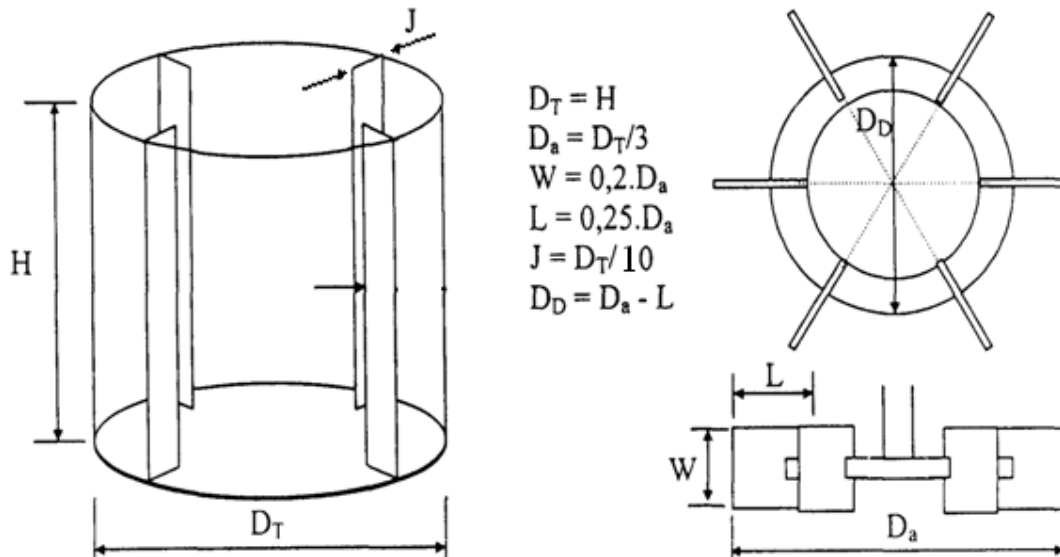


Figura 4: Dimensiones de acuerdo con el método de Rushton siendo: D_T el diámetro del estanque, H la altura del estanque, D_a el diámetro del agitador, D_D el diámetro del disco, J la anchura de la pala y W la altura de la pala.

Los instrumentos utilizados en la realización de los testes fueron los siguientes: dinamómetro, termómetro, tacómetro, medidor de pH, medidor de turbidez y balanza digital.

4.2 Métodos

- a) Se fijó al motor el eje con agitador (impelente) con seis palas llanas del tipo turbina;
- b) Se preparó la solución contaminante con concentración definida en 0,125g/l;
- c) Se ajustó el nivel del líquido en el estanque, obedeciéndose la relación "diámetro del estanque igual la altura del líquido" de acuerdo con el método de Rushton;
- d) Se definió los puntos para la obtención de las muestras, que servirán para las mediciones de la turbidez;
- e) Se midió la turbidez (para las escalas de ampliación se ajustó la turbidez para la misma en la escala 1);
- f) Se fijó el pH en 6,5;
- g) Se ajustó la rotación para 1300 RPM (mezcla rápida) y se midió la fuerza;
- h) Se preparó la solución de coagulantes con la concentración definida en 50 ppm, utilizándose el líquido del estanque para no alterarse el volumen;
- i) Se puso en marcha el motor y se añadió el coagulante en el centro de la turbina, próximo al eje;
- j) Se midió el tiempo de 5 segundos para la mezcla rápida;
- k) Se redujo la rotación para 60 RPM, para la mezcla lenta;
- l) Se recolectó las muestras para medirse la turbidez, en los puntos definidos con tiempo cero;
- m) Tras las medidas se devolvió las muestras para el estanque en puntos diametralmente opuestos;
- n) En un tiempo T de 15 minutos se recolectó las muestras para medirse la turbidez, en los puntos pre-definidos;
- o) Tras las medidas se devolvió las muestras para el estanque en puntos diametralmente opuestos;
- p) En un tiempo T de 30 minutos se paró el motor y se recolectó las amuestras para medirse la turbidez, en los puntos pre definidos (se empezó el estudio de la sedimentación);
- q) Tras las medidas se devolvió las muestras para el estanque en puntos diametralmente opuestos;
- r) En un tiempo T de 45 minutos se recolectó las muestras para medirse la turbidez, en los puntos pre definidos;
- s) Se repitieron los procedimientos (q) y (r) para los tiempos de: 60, 75 y 90 minutos.

Nota:

- 1) Se empleó en la recolección de las muestras una jeringa de 40 ml adaptada a una manguera de 40 cm de largo en la extremidad, siendo limpia 5 veces con agua destilada y adaptada con la propia solución y devuelta al estanque en puntos diametralmente opuestos;
- 2) La recolección de las muestras empezó por la concentración más diluida, o sea, del tope del estanque al fondo del estanque.
- 3) La potencia experimental (Pot) en Watts fue determinada por $Pot = F b 2 \pi n$ siendo F la fuerza (Newtons), b el brazo (m) y n la rotación (rps).

5. RESULTADOS

La tabla 1 presenta los resultados para turbidez en función del tiempo, obtenidos en los ensayos que están ilustrados en las Figuras 5, 6, 7, 8 e 9.

Tabla 1 – Planilla con los Valores Obtenidos en los Ensayos

	ESCALA 1 V = 1,5 ℓ	ESCALA 2 V = 9,0 ℓ					ESCALA 3 V = 48 ℓ						
Concentración del contaminante	0,125 g/ℓ	0,125 g/ℓ					0,125 g/ℓ						
pH Óptimo	6,5	6,5					6,5						
Concentración Óptima de Coagulante	50 ppm	50 ppm					50 ppm						
Tiempo Mezcla Rápida	5 s	5 s					5 s						
Tiempo Mezcla Lenta	30 min*	30 min*					30 min*						
Rotación Mezcla Lenta (RPM)	60	60					60						
Rotación Mezcla Rápida (RPM)	1300	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e		
		884	729	1125	1300	409	604	412	975	1300	130		
Fuerza Medida (N)	0,1471	3,93	2,34	5,53	7,2	0,85	5,95	2,82	11,9	15,0	0,34		
Potencia (W)	4,90	89,08	43,74	159,53	240,02	8,91	92,15	29,79	297,52	500,04	1,13		
Valores de la Turbidez (NTU)													
	T**	P***	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	
CON AGITACIÓN	0	Topo	47,8	43,5	48,7	51,7	46,5	50,6	51,5	45,5	51,6	49,7	45,2
		1/3	44,8	45,8	53,0	52,0	46,9	47,4	45,5	46,2	52,3	53,5	44,4
		2/3	47,8	48,4	52,0	52,6	43,2	46,7	47,7	49,1	48,3	50,4	46,4
		Fondo	47,9	47,0	51,5	54,6	42,8	40,4	42,2	46,0	49,1	52,4	44,9
	15	Topo	32,5	42,8	46,8	47,9	40,2	44,7	45,9	42,2	50,3	49,5	42,7
		1/3	29,3	43,2	48,1	48,9	38,9	43,2	48,5	45,0	51,2	51,0	43,5
		2/3	32,7	46,1	47,0	49,8	36,8	38,9	47,7	44,3	50,0	50,4	43,9
		Fondo	26,3	42,0	48,9	50,3	38,4	41,9	45,5	44,9	49,0	49,9	43,4
	30	Topo	29,2	42,8	44,1	47,8	34,9	39,2	43,6	43,1	48,0	43,9	42,6
		1/3	25,8	41,7	45,3	46,0	32,6	38,9	42,6	41,7	47,2	48,2	40,7
		2/3	27,8	38,7	46,1	46,2	29,2	38,0	41,1	39,9	49,3	45,8	40,5
		Fondo	36,6	38,1	45,8	47,4	27,0	37,8	42,5	41,7	49,6	44,6	41,3
SIN AGITACIÓN	45	Topo	23,6	40,0	40,0	40,6	28,2	36,0	38,8	33,5	50,8	44,5	40,1
		1/3	23,5	39,7	40,8	40,9	30,0	36,1	37,6	39,3	51,6	45,8	37,5
		2/3	23,9	39,8	41,1	41,7	25,6	32,9	37,3	40,5	46,9	47,6	41,8
		Fondo	25,1	38,2	41,9	42,1	28,2	34,4	37,2	37,3	49,7	45,1	39,9
	60	Topo	22,4	38,7	37,3	38,4	25,5	33,0	36,5	30,3	43,9	39,2	38,6
		1/3	23,4	37,0	38,7	39,2	24,1	33,1	35,2	32,3	46,2	43,1	36,3
		2/3	22,9	39,3	40,5	39,2	24,5	31,6	34,0	36,4	48,0	42,2	39,5
		Fondo	21,8	36,7	38,6	38,4	24,8	36,8	36,3	37,3	45,5	45,7	38,8
	75	Topo	19,7	36,9	35,8	36,0	22,3	31,3	33,3	27,2	44,6	39,0	35,7
		1/3	20,6	37,9	36,4	36,3	23,5	31,0	31,6	31,1	43,5	40,8	38,1
		2/3	20,0	35,2	36,6	37,2	23,2	30,2	32,8	29,2	43,7	41,6	38,3
		Fondo	21,6	34,9	38,4	37,7	23,3	29,9	32,8	36,7	43,7	41,1	39,3
90	Topo	18,2	34,2	33,9	35,0	22,8	30,0	31,0	23,4	43,3	39,8	34,0	
	1/3	19,3	35,1	34,7	35,7	22,0	27,7	31,5	27,6	41,4	38,7	37,4	
	2/3	19,3	34,2	36,7	36,0	21,5	27,7	33,8	27,4	42,6	40,5	39,1	
	Fondo	22,2	36,0	36,2	35,8	21,3	29,6	31,3	32,5	40,7	42,7	38,5	

* 30 a 40 min – [1]

** T = tiempo en minutos

*** P = posición de la muestra del fluido recogida, próxima a la pared y entre dos chicanes

a – potencia por unidad de volumen constante

b – velocidad en la extremidad del impulsor constante

c – tiempo de mezcla constante

d – capacidad de bombeo constante

e – número de Reynolds constante

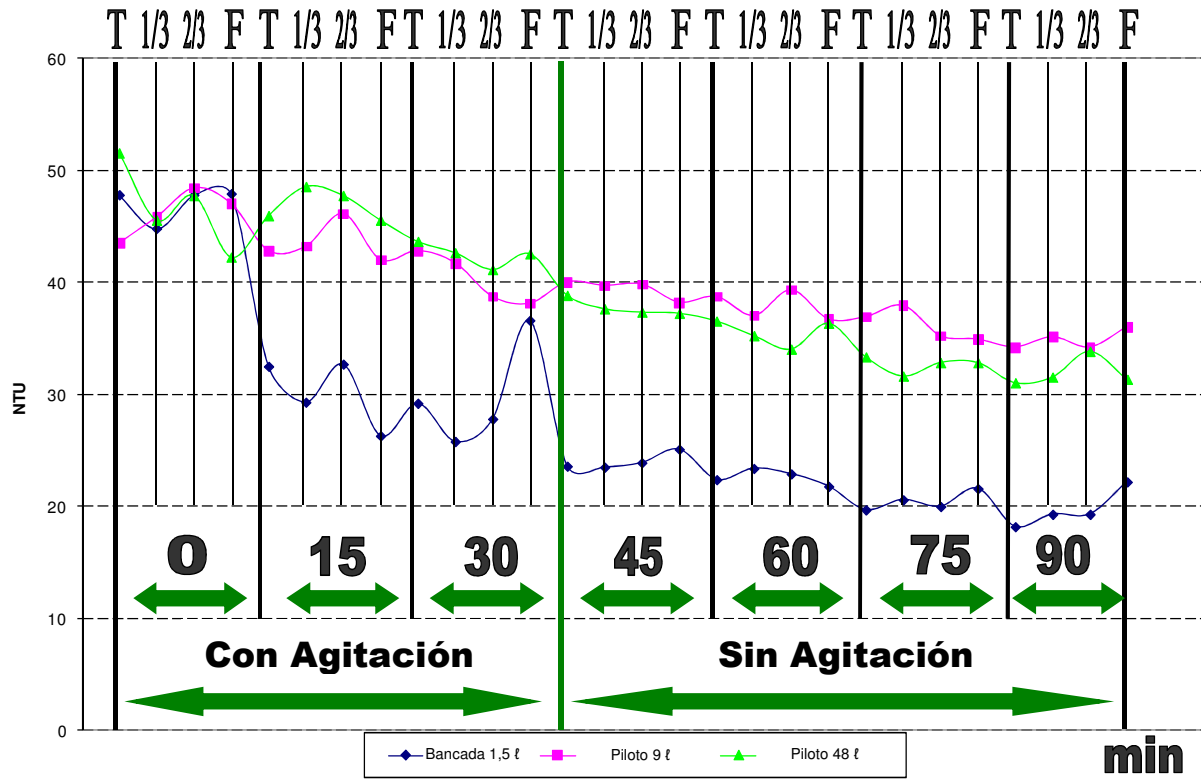


Figura 5 - Gráfico de la turbidez en función del tiempo para igual potencia por unidad de volumen

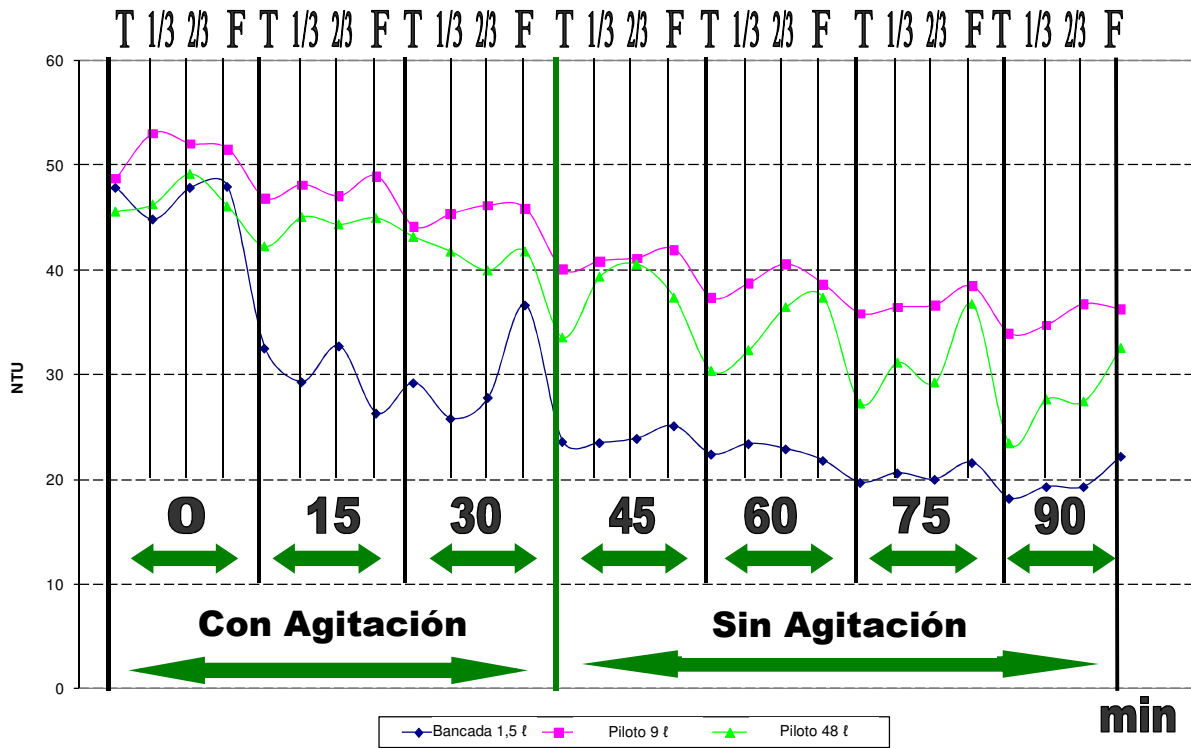


Figura 6 - Gráfico de la turbidez en función del tiempo para igual velocidad en la punta del impulsor

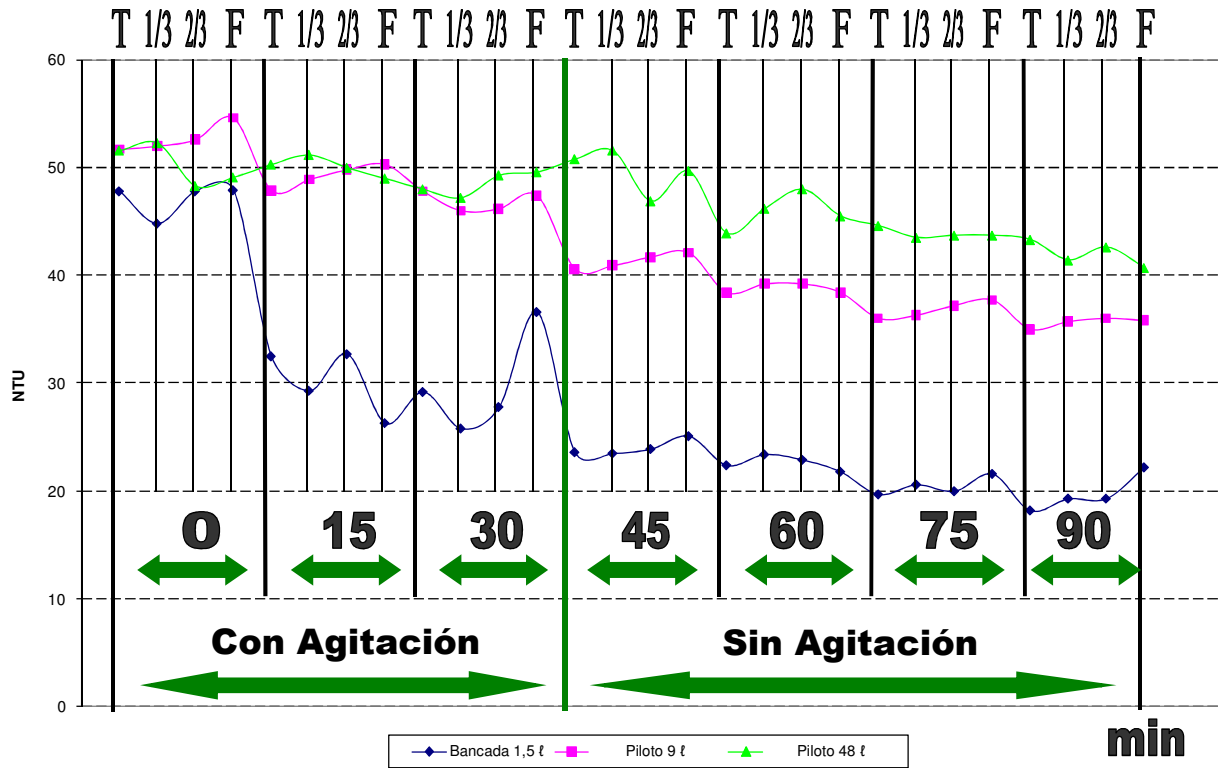


Figura 7 - Gráfico de la turbidez en función del tiempo para igual tiempo de mezcla

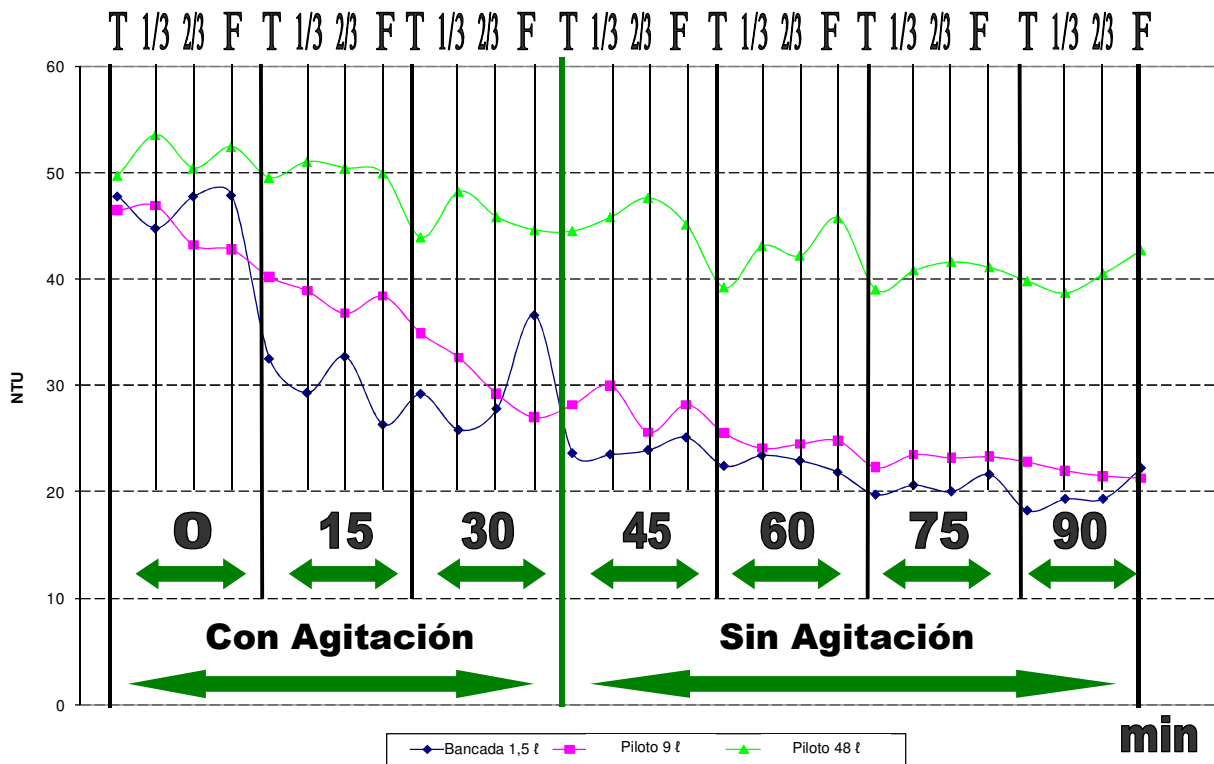


Figura 8 - Gráfico de la turbidez en función del tiempo para igual capacidad de bombeo

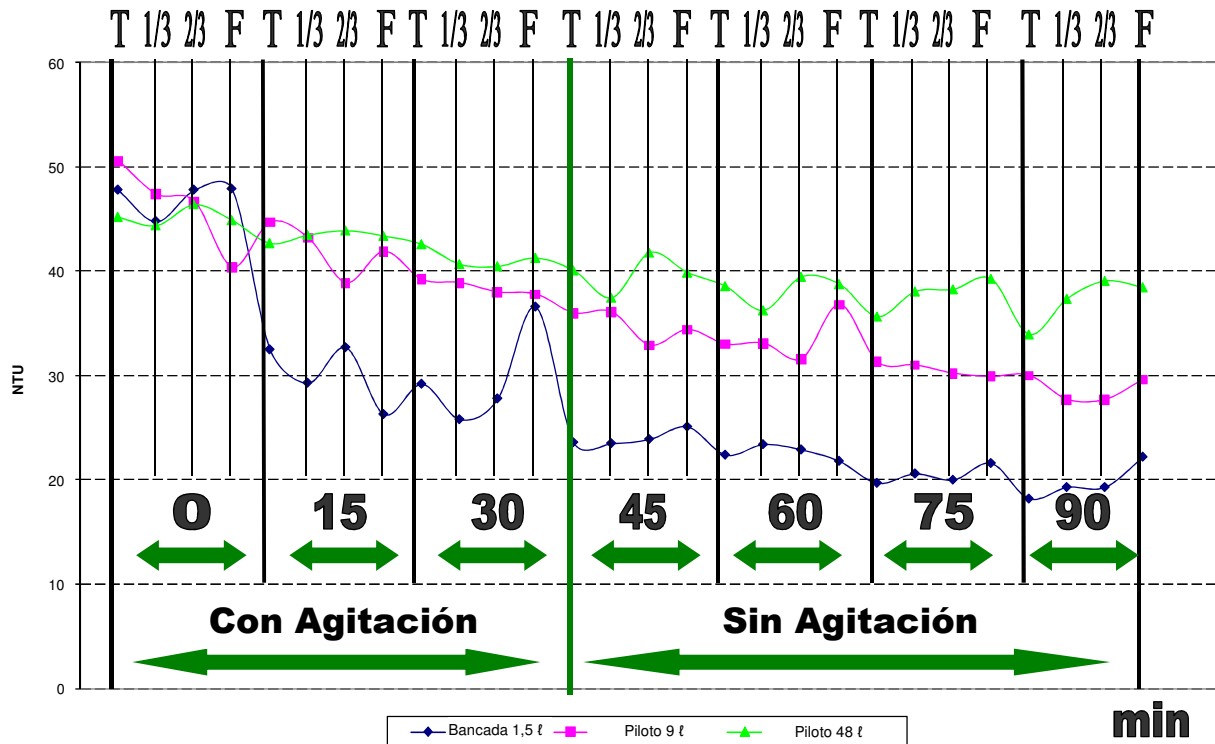


Figura 9 - Gráfico de la turbidez en función del tiempo para igual número de Reynolds

6. CONCLUSIONES

En este estudio se concluyó que la técnica de la constancia del número de Reynolds fue la que presentó la menor rotación (409 y 130 rpm) en la mezcla rápida y con mejores resultados de reproducibilidad de turbidez entre los estanques de 9 y 48 l. Es oportuno recordarse que la potencia consumida está directamente proporcional al cubo de la rotación, que es una variable de extrema importancia en la reducción de los costes de operaciones y mantenimiento en las unidades con impulsores mecánicos.

7. REFERENCIAS

- [1] Richter, C. A.; Azevedo Netto, J. M. de, *Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada*, Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 2007.
- [2] Joaquim Jr., C. F. et al., *Agitação e Mistura na Indústria*, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora SA, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [3] Badino, A. C. J.; Schmidell, W., *Biotechnologia Industrial*, Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 2001.
- [4] Ludwig, E. E., *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, 2ª Edição, 1977.

Agradecimientos

Les agradecemos a la Dirección del Centro Universitario de FEI y a la Dirección de la Universidad Santa Cecilia por el apoyo que recibimos durante la ejecución de este trabajo.