

Análisis por Simulación del Proceso de Sedimentación en el Clarificador Secundario de una Planta de Lodos Activados

José Peralta¹, Carlos Córdoba¹, Miguel Rosa¹ y Graciela Trombini¹

1: Grupo GISIQ, Facultad Regional Villa María, Universidad Tecnológica Nacional. Avda. Universidad 450, 5900, Villa María, Córdoba. Tel. y fax: 0353-4537500.

*e-mail: josperalt@yahoo.com

Resumen. *En este trabajo, empleando la técnica de simulación de procesos, se analizó el desempeño del proceso de sedimentación secundaria para el caso particular de aguas residuales de una industria láctea. El modelo de simulación se formuló en base a los fundamentos teóricos clásicos del diseño de un sedimentador. Una vez determinados estos parámetros, se simuló el comportamiento del módulo utilizando Matlab® y Simulink®. Como factores con efecto sobre la concentración de sólidos del efluente se consideraron, el caudal y la concentración de sólidos totales de entrada al sedimentador afectados de una variabilidad típica para los efluentes lácteos. En ambos casos se evaluó la capacidad del proceso en diferentes condiciones de operación. Los resultados alcanzados permitieron establecer la validez y versatilidad de las herramientas informáticas utilizadas para la simulación y análisis estadísticos de casos concretos.*

Palabras claves: *simulación, sedimentación, efluentes lácteos, análisis de capacidad.*

Abstract. *In this work, we analyzed the performance of a secondary sedimentation process for a particular case of dairy wastewater treatment using simulation techniques. The simulation model was developed based on classic design. We simulated the behavior of the sedimentation unit using Matlab® and Simulink®. Factors with effect on the concentration of solids of the effluent were considered. In this work, the flow rate and the concentration of total solids entering the settler with variability found in typical dairy effluent were analyzed. In both cases the process capability was assessed under different operating conditions. The results obtained allowed to establish the power and versatility of these tools for simulation and statistical analysis of practical cases.*

Keywords: *simulation, settling operation, dairy effluents, capability analysis*

INTRODUCCIÓN

El proceso de lodos activados es utilizado para el tratamiento de efluentes tanto industriales como urbano - domiciliarios desde hace aproximadamente un siglo y se originó a partir de observar que la aireación durante un cierto tiempo de un agua residual reduce su contenido de materia orgánica a la vez que se genera un lodo floculento formado por una población heterogénea de microorganismos, llamada biomasa.

Una planta convencional de lodos activados consiste básicamente de un reactor biológico en el que se produce la oxidación de la materia orgánica y un sedimentador secundario en el que se separan los lodos, recirculando la mayor parte de ellos al reactor, mientras que una fracción menor es desechada

del sistema y derivada para su disposición final. La fracción de lodos eliminada determina la edad de los lodos, definida como la relación entre la masa total de lodos en el sistema y la masa de los mismos eliminada diariamente. Este importante parámetro determina aspectos tales como las condiciones de sedimentación y posibilidades de nitrificación (Gil Rodríguez, 2003). Para que el proceso en su conjunto funcione adecuadamente, los lodos del efluente del reactor deben separarse rápidamente en el clarificador secundario, siendo el diseño del mismo de primordial importancia para que el proceso resulte eficiente, y de esta manera satisfacer los requerimientos de vertido del efluente tratado (Ramalho, 1998).

Si bien el cálculo de los parámetros de diseño de un sedimentador secundario generalmente se lleva a

cabo considerando el funcionamiento en estado estacionario, resulta de sumo interés analizar posteriormente el comportamiento dinámico de la etapa, con la finalidad de poder evaluar su desempeño frente a probables fluctuaciones de alguna de las variables de la corriente de entrada.

El modelado matemático del comportamiento dinámico de un sedimentador secundario resulta bastante complejo y su resolución requiere con frecuencia de cálculos gráficos y, en gran parte, de consideraciones de estado estacionario. En este sentido, Pflanz (1969) consideró al sedimentador constituido por dos zonas homogéneas, una superior de clarificación y otra de sedimentación, en las que ambas corrientes transitan por el equipo con la misma dinámica, en principio descripta por un retardo puro para cada una. La hipótesis de Pflanz, que supone que la concentración de lodos separados del efluente en estado de equilibrio, es proporcional a la cantidad de lodos que entra al decantador e inversamente proporcional a la sección del mismo, fue luego tomada como base para obtener las ecuaciones dinámicas del sedimentador (Hamalainen, 1975). El uso de los modelos matemáticos basados en la hipótesis de Pflanz resultó de aplicación solamente para aquellos casos de escasa variabilidad, sobre todo de caudales, por lo que se propusieron modelos matemáticos más complicados para determinar la concentración de sólidos en suspensión de las corrientes de clarificación y sedimentación, sometidas a fuertes variaciones de caudal y composición en la alimentación.

Por otro lado, el creciente desarrollo de la simulación de procesos, indujo al diseño de programas de computación capaces de efectuar la simulación propiamente dicha y de evaluar la confiabilidad de los modelos matemáticos propuestos mediante la com-

paración con datos experimentales. Sumado a esto se dispone en la actualidad de numerosas herramientas informáticas para llevar a cabo el análisis estadístico de procesos y determinar de esta manera la capacidad del mismo.

En un trabajo anterior de los autores (Trombini et al., 2011), se determinaron los parámetros de diseño de un clarificador secundario de efluentes lácteos utilizando el software Matlab®. A partir de los resultados obtenidos en tal oportunidad, en este trabajo se analizó el comportamiento dinámico del proceso de decantación para el mismo caso particular de aguas residuales de una industria láctea. Los resultados alcanzados permitieron establecer la validez de las herramientas computacionales empleadas para la resolución de casos concretos y en particular su versatilidad para analizar distintas condiciones de operación.

DESARROLLO METODOLÓGICO

Los parámetros de diseño del sedimentador secundario fueron obtenidos (Trombini et al., 2011) para Q_o (caudal de entrada al clarificador) = 8000 m³/h y X_o (concentración de sólidos a la entrada del clarificador) = 2230 mg/l. Las variables prefijadas fueron:

X_e : concentración de sólidos a la salida del vertedero, según legislación vigente = 50 mg/l

H_{cap} : capacidad de almacenamiento = 0.5 m

H_{imm} : inmersión de la alimentación = 0.5 m

X_f : concentración de sólidos en la corriente de fondo del sedimentador, en mg/l.

Th : tiempo de residencia, en horas.

α : ángulo de inclinación del fondo, en rad.

Los resultados obtenidos en el diseño se muestran en la Tabla I.

Parámetros fijados por el usuario			Valores calculados por el programa			
Th (h)	X_f (mg/l)	α (rad)	Diám. (m)	Área (m)	Vol. (m ³)	Altura (m)
3	7500	0.07	30.68	739.22	2532.16	3.43
2.5	7500	0.07	30.68	739.22	2365.49	3.20
3	7000	0.05	24.72	479.92	1790.79	3.73
2.5	7000	0.05	24.72	479.92	1624.12	3.38
2.5	6500	0.05	19.99	313.70	1311.32	4.18
2	6500	0.05	19.99	313.70	1144.66	3.65
3	6000	0.05	16.46	212.66	1304.36	6.13
2	6000	0.05	16.46	212.66	971.02	4.57

Tabla I: Parámetros de diseño y valores calculados por el programa para un caso particular

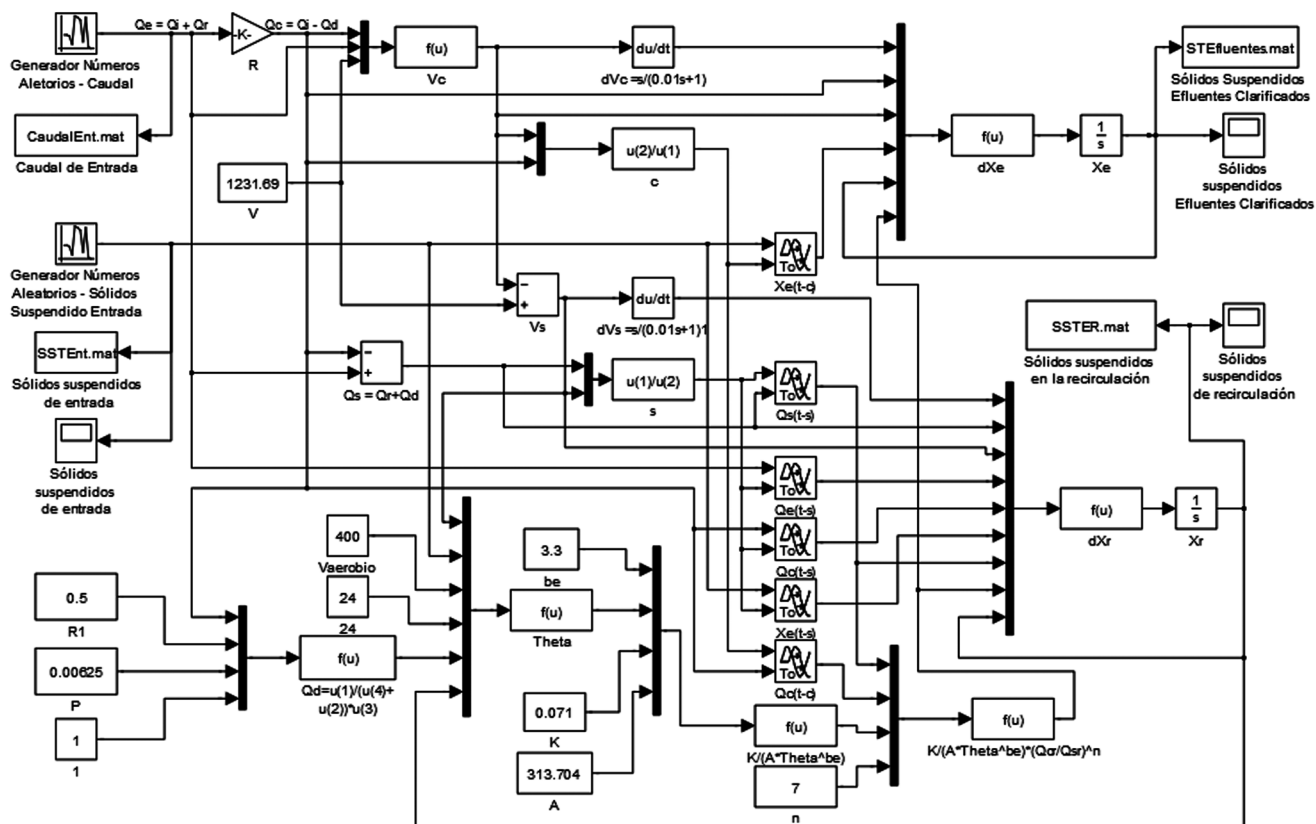


Figura 1: Simulación de un proceso de sedimentación secundaria utilizando Simulink

En el ejemplo planteado se observó que para valores superiores a los 6500 kg/h de concentración de sólidos en la descarga, el volumen del clarificador se incrementaba significativamente, lo cual implica mayores costos de inversión y de mantenimiento. Por esta razón se consideró como diseño adecuado el correspondiente a un tiempo de residencia de 2 hs. con una concentración de sólidos en el fondo de 6500 kg/h. Para estos datos de diseño, se simuló el proceso de sedimentación secundaria utilizando el programa Simulink. El modelo utilizado se basó en el proceso presentado por Gil Rodríguez (2003) con modificaciones parciales (Figura 1).

Se consideró para el caudal y los sólidos suspendidos de la corriente de entrada al sedimentador un cierto intervalo de variación con valores nominales iguales a los de diseño. En la Tabla II se muestran estos valores, los que representan una variación de caudal de aproximadamente un 11 % y del 4 % en los sólidos totales. Luego, utilizando la herramienta de generación de números aleatorios de Simulink, basada en el método de Monte Carlo se generaron datos de caudal de entrada y de sólidos totales con distribución normal. Los parámetros para esta distri-

bución (media y varianza) fueron fijados teniendo en cuenta el valor nominal y una desviación equivalente a 30% del rango de variación adoptado. Estos valores permitieron obtener números aleatorios dentro del rango fijado para ambos parámetros en un porcentaje cercano al 100%.

Variable	Valor mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
Caudal de entrada (m ³ /h)	7100	8000	8900
Sólidos totales entrada (mg/l)	2150	2230	2310

Tabla II: rango de variación de caudal y sólidos totales para la alimentación al sedimentador

El análisis de la variación de los sólidos del efluente clarificado se realizó en base a las especificaciones de las normas provinciales de la Agencia Córdoba Ambiente que fijan para vertidos en cursos

de agua (conductos pluviales) un valor máximo de 50 mg/l (Decreto 415 / 99 Normas para la protección de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Provincia, Anexos I y II).

Se analizó el efecto sobre la concentración de sólidos del efluente de salida, de las variaciones en el caudal y de los sólidos por fuera de los parámetros de funcionamiento en condiciones de régimen normal del sedimentador. Para este análisis se consideraron variaciones del caudal de + 5 %, + 7.5 % y + 10 % del valor nominal en condiciones de funcionamiento normal, esto es, para caudales de 8400 m³/h, 8600 m³/h y 8800 m³/h, manteniendo la desviación estándar constante. En este caso los sólidos totales disueltos se mantuvieron dentro de los límites fijados en la tabla. En una segunda etapa se variaron los sólidos de entrada en el mismo rango utilizado para el caudal, manteniendo las variaciones de este último parámetro dentro de los límites de variación fijados en la tabla.

Finalmente se ejecutó el análisis de la capacidad de proceso, una técnica estadística que permite cuantificar la variabilidad del mismo respecto a los requerimientos o especificaciones del producto y que representa una medida de la uniformidad de la salida. Para medir esta variabilidad se acostumbra a tomar los límites de tolerancia natural superior (LTNS) e inferior (LTNI) del proceso en comparación con las especificaciones. Estos límites se definen como $LTNS = \mu + 3\sigma$ y $LTNI = \mu - 3\sigma$ y para una distribución normal incluyen el 99.73 % de las mediciones de la variable. En la comparación, se observa si los límites se encuentran dentro del intervalo definido por las especificaciones. También puede considerarse la comparación de una de las especificaciones con respecto a uno de los límites de tolerancia, tal como resulta para el caso planteado en este trabajo, donde se compara el límite de especificación superior (LES) con respecto al límite de tolerancia superior. Si dicho límite se encuentra por debajo de la especificación considerada, se concluye que el sistema es capaz de cumplir con los requerimientos. Una forma clásica de análisis utiliza un histograma, que junto con el promedio y la desviación estándar de la muestra en estudio, proporcionan información sobre la capacidad del proceso, ya que estos definen el LTNS. Para una comparación visual adecuada se superponen al histograma la especificación considerada y el LTNS del proceso; esta técnica proporciona una visión inmediata del desempeño del proceso como puede observarse en la Figura 2.

Por otra parte, también se evaluó el índice de capacidad del proceso (Cpk), el cual complementa el método gráfico y representa una forma cuantitativa simple de expresar dicha capacidad. Se trata de un índice unilateral definido por: $Cpk = (LES - \mu) / 3\sigma$. Si Cpk es mayor que 1, indica que el intervalo definido por $(LES - \mu)$ es mayor que el intervalo definido por 3σ (que define el LTNS). Visualmente se observa si el LTNS está por debajo del LES, en cuyo caso el proceso resulta con capacidad para cumplir con las especificaciones. Cuando esto sucede, se considera que más del 99.73% de los valores de salida se encuentran dentro de los valores especificados. Sin embargo, para asegurar que el proceso tenga una mínima probabilidad de generar salidas que superen las especificaciones, se desea que este índice esté por encima de 1.33. Cuando mayor sea el mismo, mayor capacidad tendrá el proceso y existirán menos probabilidades de encontrar respuestas fuera de especificaciones.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de salida para los sólidos suspendidos en el efluente clarificado fueron analizados estadísticamente utilizando un histograma generado a partir de los resultados de la simulación. También se calculó el valor de Cpk a los fines de cuantificar la capacidad del proceso. Se muestran los resultados del efecto producido sobre la capacidad del proceso, por variaciones en el caudal de entrada (Figuras 3 a 5) y en la concentración de los sólidos suspendidos (Figuras 6 a 8).

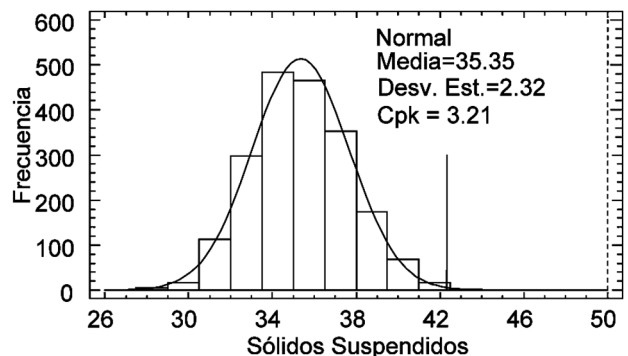


Figura 2: Estudio de la capacidad inicial del proceso de sedimentación.

En la Figura 2 se observan los datos en condiciones de funcionamiento del sedimentador previo a la simulación de variaciones en el caudal y concentración de sólidos suspendidos. La línea de mayor lon-

gitud sobre el valor 50 mg/l en abscisas, representa el límite superior de la especificación establecida por el organismo provincial. La línea de menor longitud representa el límite de tolerancia natural superior del proceso. A la derecha de la figura se muestran los valores nominales y desviación estándar de los datos de sólidos suspendidos del efluente clarificado en este proceso. También se consignan los valores de los índices de capacidad del proceso (Cpk). Para condiciones de funcionamiento establecidas por diseño para el caudal y los sólidos suspendidos de entrada, se observa que no hay datos de salida por encima de la especificación. El Cpk alcanza un valor de 3.21, lo cual indica que el límite de tolerancia superior del efluente se encuentra muy por debajo de la especificación superior, existiendo una muy baja probabilidad de que no se cumpla con la reglamentación bajo estas condiciones de trabajo. En todos los casos se realizaron las pruebas de normalidad requeridas para el cálculo de la capacidad del proceso y los datos obtenidos de sólidos en efluentes pueden considerarse como provenientes de una población con distribución normal.

En la Figura 3 se muestra el efecto sobre los sólidos suspendidos del efluente clarificado cuando el caudal aumenta un 5% de su valor nominal. Se observa una pequeña área del histograma, representativa de la probabilidad de encontrar valores por encima de especificaciones. Sin embargo el índice de capacidad de proceso es aún elevado (Cpk = 1.62), lo cual permite inferir que el proceso es capaz de cumplir satisfactoriamente con las especificaciones de vertido.

En la Figura 4, cuando el caudal aumenta un 7.5 % del valor nominal, el proceso no presenta una buena capacidad para cumplir con las especificaciones, el Cpk = 0.92 es mucho menor al valor de 1.33 sugerido como conveniente. El límite superior de tolerancia se encuentra por encima del límite superior de especificación y el área del histograma que supera al mismo es relativamente mayor.

Cuando el caudal aumenta un 10% del valor nominal de diseño (Figura 5), el Cpk = 0.29 indica que las especificaciones no se cumplen y la probabilidad de que los sólidos suspendidos del efluente clarificado estén por encima de 50 mg/l es elevada, cercana a un 40 %.

En la Figura 6 se muestra el efecto sobre la capacidad del proceso cuando varían los sólidos suspendidos en la entrada en un 5 % del valor nominal de diseño, manteniendo la media del caudal en el valor

nominal fijado inicialmente. El Cpk toma un valor mayor a 1.33 (Cpk = 2.7) y el proceso cumple holgadamente con las especificaciones.

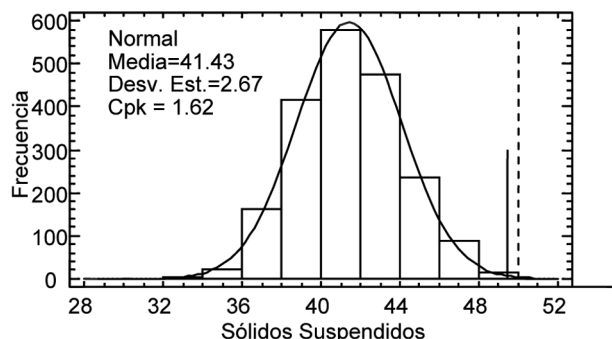


Figura 3: Estudio de la capacidad del proceso con variación del 5% del caudal de entrada.

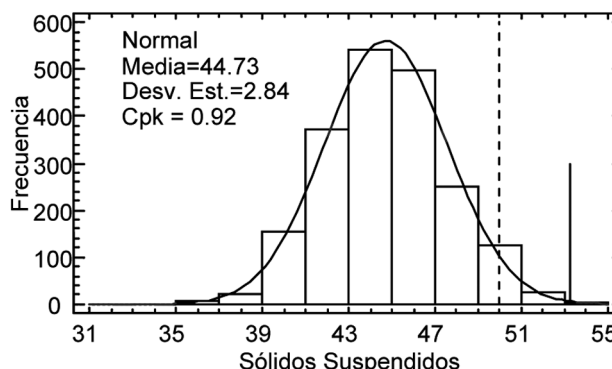


Figura 4: Estudio de la capacidad del proceso con variación del 7.5% del caudal de entrada

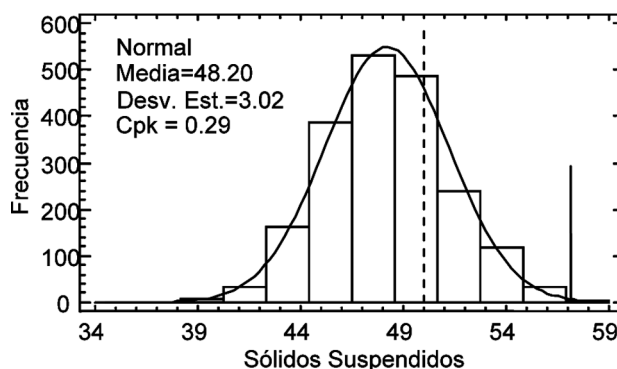


Figura 5: Estudio de la capacidad del proceso con variación del 10% del caudal de entrada

En la Figura 7 se observa el efecto de una variación del 10 %. El Cpk es de 2.22 y el proceso conserva la capacidad para cumplir con las especificaciones de vertido.

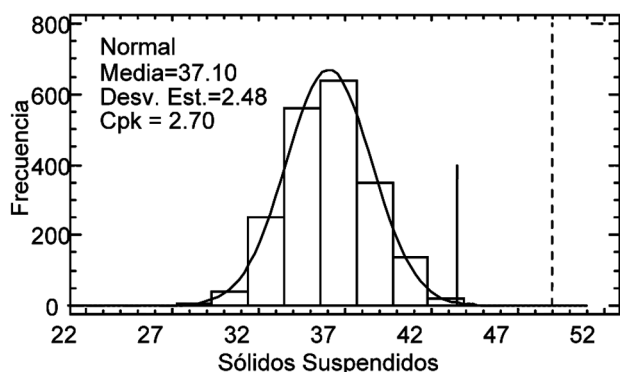


Figura 6: Estudio de la capacidad del proceso con variación del 5% en la concentración de sólidos totales de entrada.

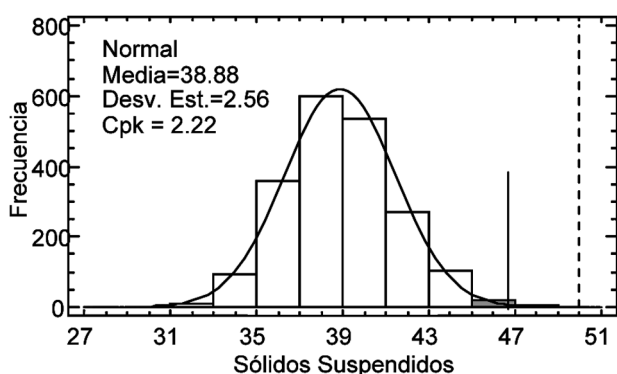


Figura 7: Estudio de la capacidad del proceso con variación del 10% en la concentración de sólidos totales de entrada.

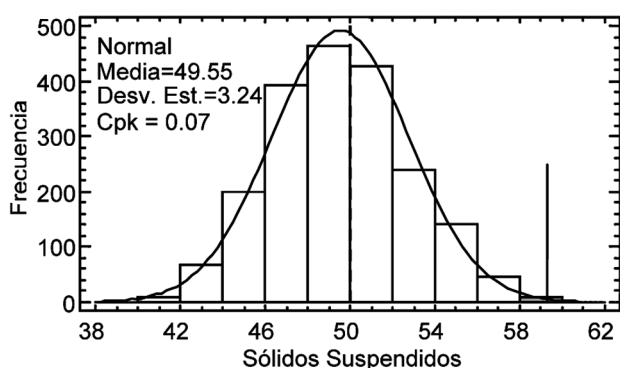


Figura 8: Estudio de la capacidad del proceso con variación del 40% en la concentración de sólidos totales de entrada.

Recién con variaciones próximas al 40 % por encima del valor nominal de los sólidos suspendidos en la corriente de entrada se alcanzan los mismos efectos que con variaciones del 10% en el caudal. Puede observarse que el Cpk es mucho menor que 1 y la probabilidad de superar los valores de concentración de sólidos de las especificaciones es cercana al 50% (Figura 8).

CONCLUSIONES

El mayor efecto sobre los sólidos totales suspendidos en el efluente clarificado, en este caso de estudio, se presenta cuando se varía el caudal de entrada al sedimentador, observándose un aumento continuo y una incapacidad del proceso para cumplir con las especificaciones cuando el caudal supera el 5% del valor nominal de diseño. Para estas variaciones el índice de capacidad disminuye por debajo de 1.33, valor considerado como referencia.

El efecto producido por las variaciones en la concentración de sólidos en la alimentación es menor que el producido por variaciones en el caudal. Para un aumento del 10% en el valor nominal, el índice de capacidad es mucho mayor que el Cpk de referencia. Se requieren variaciones a la entrada mucho mayores al 10% sobre el valor medio para provocar efectos similares a los observados con los caudales.

Los resultados obtenidos indican que deben evitarse aumentos sostenidos en el caudal, aún en pequeñas variaciones, ya que éstas podrían llevar al incumplimiento de las especificaciones establecidas. Las soluciones ingenieriles para la prevención de fallas del sistema dependerán de diferentes factores en función de las variaciones de caudal esperadas y del diseño del proceso completo de tratamiento.

Por último, cabe destacar que la herramienta de la simulación, sumada al análisis estadístico de los resultados resulta de gran utilidad para el estudio del comportamiento de este tipo de procesos con vistas a la prevención de fallas en el sistema.

REFERENCIAS

Decreto 415/99 Normas para la Protección de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos de la Provincia. Anexos I y II. Provincia de Córdoba, (1999).

Gil Rodríguez, M. (2003). “Cálculos Avanzados en Procesos de Descontaminación de Aguas”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Universidad Politécnica de Madrid, 131-158.

Hamalainen, R.P., Halme, A. and Gyllenberg A. (1975). “A Control Model for Activated Sludge Wastewater Treatment Process”, Conference IFAC, Boston.

Pflanz, P. (1969). “Advances in Water Pollution Research”, H. S. Jenkins (Ed), Pergamon Press, London.

Ramalho, R. (1998). "Tratamiento de Aguas Residuales", págs. 291 – 292, Reverté, Barcelona.

Trombini, G., Rosa, M., Córdoba, C. and Peralta, J. (2011). "Determinación de los Parámetros de Diseño de un Clarificador Secundario de Efluentes Lá-

teos Utilizando Matlab®", 10º Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos, CAIP'11. Actas en CD, págs. 413 - 420, J. Poch J. Seralols, I. Villaescusa, N. Fiol, F. Prados y D. Pujol, Editores. ISBN: 978-84-8458-356-1. Girona, España.