

## **Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara**

### **Treatment for coagulation-flocculation to effluent from Ernesto Che Guevara Company of Nickel**

**Ing. Sorangel Rivas-Romero; Ing. Gerardo Menés-Vuelta; Ing. Aimet Rómulo-Rodríguez**

Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ). Cuba. srivas@cil.moa.minem.cu

---

#### **Resumen**

El efluente del sedimentador de carbonato de la Empresa de Níquel Comandante Ernesto Che Guevara, como promedio, contiene 183,03 mg/L de níquel total, de este el 81,3 % se encuentra en forma de níquel disuelto. Se pretendió recuperar la mayor cantidad de níquel posible de este efluente mediante un proceso de coagulación - floculación. Se realizaron corridas con la adición de cal hidratada a diferentes dosis como coadyuvante de la coagulación y otras con el efluente pre-destilado. Se evaluaron seis coagulantes de diferentes compañías en varias dosis, y un floculante común para todas las pruebas. Los mejores resultados fueron obtenidos con el empleo del sulfato de aluminio en dosis de 300 mg/L y cal hidratada a 150 mg/L , con una recuperación del 91,70 % de níquel total y 88,67 % del níquel disuelto. Con el efluente pre-destilado no se lograron altos valores de precipitación.

**Palabras clave:** efluente, níquel disuelto, coagulante.

---

## Abstract

Commander Ernesto Che Guevara Nickel Company's Carbonate thickener effluent, as an average, contains 183,03 mg/L of total nickel, from this 81,3 % is in a dissolve nickel form. This paper aim was to recover the greatest quantity of nickel as possible from this effluent by using the coagulation –flocculation process. Test runs were carried out with hydrated lime addition in different dosages, for aiding coagulation and other ones with the previously distilled effluent. Six coagulants from different companies were assessed in different dosages, including an effluent that is common for all the tests. The best results were obtained with the use of the aluminum sulfate in dosages of 300 mg/L as well as hydrated lime at 150 mg/L, with a recovery of 91,70 % of the total nickel and 88,67 % of the dissolved nickel. With the predistilled effluent no high precipitation values were achieved.

**Keywords:** effluent, dissolved nickel, coagulant.

---

## INTRODUCCION

En la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), el producto de la destilación de la solución obtenida en la lixiviación carbonato-amoniaca es enviado a un sedimentador con el objetivo de lograr la densidad necesaria para la continuidad del proceso.

El reboso de la sedimentación posee una concentración de níquel total promedio de 183,03 mg/L y el 81,3 % se encuentra en forma de níquel disuelto, para la recuperación de este elemento se utiliza la precipitación con hidrosulfuro de amonio; esta tecnología tiene los siguientes inconvenientes: elevado costo de operación , la fabricación del producto denominado sulfuro de níquel el cual es de difícil venta y bajo precio, además de traer consigo una elevada contaminación ambiental por las emanaciones de ácido sulfhídrico en el área de precipitación de sulfuro.

En este efluente los sólidos en suspensión representan aproximadamente el 18,7 % de la concentración de níquel total del efluente y están compuestos por carbonato e hidróxido de níquel, se componen de partículas muy finas (0,7 a 200  $\mu\text{m}$ ) que en su mayoría están en estado de coloides.

El proceso de coagulación garantiza que las partículas coloidales se agrupen con la variación de sus cargas eléctricas superficiales y otras que se adhieran a los copos, aumentando así su tamaño, lo que trae consigo un aumento de la velocidad de sedimentación.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la recuperación de la mayor cantidad de níquel posible, mediante un proceso de coagulación-floculación al efluente del sedimentador de carbonato antes de ser enviado a la precipitación con hidrosulfuro de amonio.

## **FUNDAMENTACION TEORICA**

### **Características del efluente [7]**

El contenido de níquel total promedio es de 183,03 mg/L y el 81,3 % está en forma de níquel disuelto (148,76 mg/L). La concentración promedio de aniones del tipo sulfatos presente en el efluente es de 1810,80 mg/L, superior a la del amoniaco (1362,21 mg/L), por lo que se infiere que todo el níquel disuelto está formando el complejo sulfato amoniacal de níquel. Esto último lleva a plantear la hipótesis de que para precipitar el níquel y lograr su recuperación, es necesario romper dicho complejo.

La granulometría máxima de los sólidos en suspensión es de 43,27  $\mu\text{m}$ . Las partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  (estado coloidal) están presentes en un 28,53 %.

### **Coagulantes**

Los coagulantes se usan generalmente en el tratamiento de aguas naturales e industriales para aglomerar los sólidos en suspensión. La coagulación consiste en la neutralización de las cargas eléctricas de los coloides que componen una solución [2,3-10].

Los coagulantes inorgánicos más empleados son:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  (sulfato de aluminio),  $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$  (aluminato de sodio),  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (\text{NH}_4)\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$  (alumbre de amonio),  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (caparrosa),  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  (sulfato férrico),  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (cloruro férrico);  $\text{MgO}$  (óxido de magnesio); Bentonita;  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2$  (silicato de sodio);  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de calcio).

La selección primaria de cada uno de los coagulantes depende del pH del agua, ejemplo: sulfato de aluminio (5,5 a 7,5), sulfato ferroso (8,0 a 11,0), sulfato férrico (Ferrisul, ferrifloc: 8,0 a 11,0 y ferriclear: 5,0 a 6,0). [2,3,5]

De todos los coagulantes el más utilizado por su bajo costo y gran efectividad es el sulfato de aluminio, aunque tiene la desventaja de su estrecho rango de pH de aplicación.

El proceso de coagulación necesita una fuerte mezcla instantánea para dispersar el coagulante y favorecer las reacciones químicas iniciales, este período necesita un tiempo de 10 min como mínimo.

### **Floculantes**

Los floculantes son polímeros que favorecen el proceso de formación de flóculos, actuando de puentes para captar las partículas en suspensión.

Existen tres tipos de floculantes, los aniónicos, los catiónicos y no iónicos. Los aniónicos se utilizan en la sedimentación de partículas minerales; los catiónicos en la sedimentación de partículas de origen orgánico y los no iónicos en la sedimentación de partículas tanto orgánicas como inorgánicas [9]. Su selección primaria además de depender del origen de las partículas también obedece al pH de la solución donde se aplique [8]. Ejemplo las acrilamidas – acrilatos son aniónicos y su pH óptimo de trabajo es de 7 a 14, las poliacrilamidas – poliaminas son catiónicos y el rango de pH es de 4 a 8 y las poliacrilamidas son no iónicos y trabajan de 6 a 10.

El proceso de floculación necesita un mínimo de agitación para no romper la cadena del polímero. El tiempo óptimo de floculación es de 15 min como mínimo [8,10].

### **Coadyuvantes de la coagulación**

La coadyuvación tiene como finalidad llevar la pulpa a un pH óptimo para ser tratado. Los coadyuvantes favorecen la coagulación, incluso a dosis de 0,5 a 4,0 mg/L, un ejemplo es la cal, usada para aportar la alcalinidad artificial necesaria para trabajar con el alumbre o la caparrosa [3].

## **METODOS UTILIZADOS Y CONDICIONES EXPERIMENTALES**

La dosis óptima de coagulante no se puede determinar con los resultados de los análisis químicos, por lo tanto se necesita realizar pruebas de jarras en una mesa de coagulación para determinar, de forma analítica y visual, el funcionamiento adecuado de cada coagulante y floculante en el proceso [4].

### **Toma de muestra:**

Se toma una muestra de agua de aproximadamente 25 L, suficiente para hacer no menos de tres réplicas en una mesa de coagulación de 6 jarras.

### **Materiales**

- Mezclador de cuatro o seis jarras que permita una agitación regulable entre 3,14 a 31,4 rad/s.
- Cuatro o seis vasos de vidrio o plásticos translúcidos con capacidad entre 1,0 y 1,5 L.
- Pipetas de 1,0, 5,0 y 10 mL.
- Equipo para medir turbiedad.
- Equipo para medir color.
- Equipo para medir pH.
- Suspensión de cal hidratada a 10 g/L de concentración.
- Coagulantes a una concentración de 10 g/L.

### **Metodología**

- Tomar aproximadamente 25 L de efluente y homogeneizar bien la muestra.

- Tomar 100 mL de muestra y determinar pH, turbidez, color níquel total y níquel disuelto antes de comenzar la prueba de coagulación para tener una referencia.
- Medir 1 L de efluente y añadir en cada jarra.
- Poner una agitación a las jarras de 10,47 rad/s para mantener una turbulencia uniforme mientras se miden los reactivos que se añadirán.
- Añadir primero la suspensión de cal hidratada (si la corrida lo requiere) y esperar un minuto.
- Añadir después la solución de los coagulantes.
- Aumentar la velocidad de 10,47 a 31,40 rad/s por un espacio de un minuto.
- Pasado este tiempo, bajar la velocidad de agitación hasta 3,14 rad/s, por un espacio de 15 minutos.
- Adicionar la solución del floculante a cada jarra.
- Una vez transcurrido el tiempo de mezcla lenta retirar los agitadores o paletas de cada jarra y dejar el sistema en reposo por un espacio de 15 minutos durante los cuales deberá observarse la apariencia o consistencia de los flóculos formados.
- Pasados los 15 min de sedimentación, tomar de cada jarra un volumen de 100 mL para la determinación de turbidez, color, pH, níquel total y níquel disuelto.

### **Interpretación**

El análisis de la muestra, cuyo resultado demuestre una mayor reducción del níquel total y el níquel disuelto, será la mejor dosis de coagulante o el mejor coagulante según el caso analizado.

## **RESULTADOS Y DISCUSION**

Se evaluaron seis coagulantes pertenecientes a diferentes compañías, se seleccionaron los fabricados a base de aluminio dado que este elemento no contamina el óxido de níquel como lo hace el hierro; y además el pH del licor (8,28 a 9,05) está en el rango óptimo de aplicación de estos productos; se utilizó un floculante con el objetivo de acelerar el proceso de sedimentación, común para todas las pruebas, se seleccionó del tipo no iónico teniendo en cuenta el pH de trabajo.

Los coagulantes fueron: SNF- AC 851, VAPEN FLOC, VAPEN FLOC PP, Chematek - hidroxiclورو de aluminio, Chematek - policloruro de aluminio y sulfato de aluminio. El floculante empleado fue el AN 210 de la compañía SNF.

Las dosis empleadas para los coagulantes fue de 100, 200 y 300 mg/L, y 0,5 mg/L para el floculante.

### **Evaluación del efecto de la adición de coagulante y floculante al efluente**

En la tabla 1 se muestra un resumen de la precipitación de níquel total obtenida al variar las dosis de cada coagulante.

**Tabla 1**  
Precipitación de níquel total en función de las dosis de coagulante

Coagulantes	Precipitación Níquel Total, %		
	Dosis, mg/L		
	100	200	300
AC 851 - SNF	6,30	9,48	8,37
VAPEN FLOC	4,64	12,86	18,47
VAPEN FLOC PP	1,67	1,90	0
Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio	10,37	16,04	16,35
Chematek - Policloruro de Aluminio	17,92	37,44	57,02
Sulfato de Aluminio	32,08	59,80	78,80

Con el empleo de los coagulantes AC 851 - SNF, VAPEN FLOC, VAPEN FLOC PP y Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio se obtuvieron muy bajas precipitaciones de níquel en todas las dosis evaluadas.

Con los coagulantes Chematek- Policloruro de Aluminio y el sulfato de aluminio se obtuvo una precipitación de níquel total de 57,02 y 78,80 % respectivamente; además se observó una correlación directa entre dosis de coagulante y porcentaje de precipitación de níquel total.

Igual comportamiento se observó en la precipitación del níquel disuelto. En la tabla 2 se recogen los resultados obtenidos.

**Tabla 2**  
Precipitación de níquel disuelto en función de las dosis de coagulante

Coagulantes	Precipitación Níquel Disuelto, %		
	Dosis, mg/L		
	100	200	300
AC 851 - SNF	20,87	8,98	9,84
VAPEN FLOC	0	8,59	21,72
VAPEN FLOC PP	9,22	11,48	12,81
Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio	7,00	18,23	22,46
Chematek - Policloruro de Aluminio	13,51	39,69	60,00
Sulfato de Aluminio	30,16	60,12	85,86

## Evaluación del efecto de la adición de cal hidratada, coagulante y floculante en el efluente

Se empleó la cal como coadyuvante en la coagulación, las dosis empleadas para la cal hidratada fueron de 50, 100 y 150 mg/L.

En la tabla 3 se muestra el resumen de la precipitación de níquel total obtenida al variar las dosis de cada coagulante y cal hidratada.

**Tabla 3**  
Precipitación de níquel total en función de las dosis de coagulante y de cal hidratada

Coagulantes	Precipitación Níquel Total, %					
	Dosis, mg/L					
	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal
	100	50	200	100	300	150
AC 851 - SNF	0		11,96		34,90	
VAPEN FLOC	11,59		9,41		29,38	
VAPEN FLOC PP	12,25		1,94		24,79	
Chematek - Hidroxiclورو de Aluminio	12,62		12,50		33,01	
Chematek - Policloruro de Aluminio	17,29		23,81		74,80	
Sulfato de Aluminio	40,76		56,65		91,70	

Los coagulantes AC 851 – SNF, VAPEN FLOC, VAPEN FLOC PP y Chematek - hidroxiclورو de aluminio lograron menores precipitaciones de níquel total que los coagulantes Chematek - Policloruro de Aluminio y el sulfato de aluminio, con estos se obtuvo una precipitación de níquel total de 74,80 y 91,70 % respectivamente; además se observó una correlación directa entre el porcentaje de precipitación de níquel total y la dosis de coagulante.

En el caso del níquel disuelto los mejores resultados se obtuvieron con el sulfato de aluminio, 88,67 %, con las mayores dosis evaluadas. Ver tabla 4.

**Tabla 4**

Precipitación de níquel disuelto en función de las dosis de coagulante y de cal hidratada

Coagulantes	Precipitación Níquel Disuelto, %					
	Dosis, mg/L					
	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal
	100	50	200	100	300	150
AC 851 - SNF	17,48		38,29		8,57	
VAPEN FLOC	36,36		0		15,38	
VAPEN FLOC PP	18,42		0		7,04	
Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio	15,07		23,98		15,71	
Chematek - Policloruro de Aluminio	11,27		37,93		62,34	
Sulfato de Aluminio	21,99		52,21		88,67	

**Evaluación del efecto de la adición de coagulante y floculante al efluente pre-destilado**

Esta evaluación tuvo como objetivo comprobar la hipótesis de que para precipitar el níquel es necesario romper el complejo sulfato amoniacal de níquel.

La pre-destilación se realizó en una plancha de calentamiento y se escogió un tiempo de retención de 25 min y temperatura 90 °C, basado en los parámetros de operación actuales de los alambiques de licor con los que cuenta esta empresa. Bajo dichas condiciones se logra una destilación entre 8,35 y 18,63 % del amoniaco presente en el efluente, promediando 13,37 %.

En la tabla 5 se muestra el resumen de la precipitación de níquel total obtenida al variar las dosis de cada coagulante con el efluente previamente destilado.

**Tabla 5**

Precipitación de níquel total en función de las dosis de coagulante con el efluente previamente destilado

Coagulantes	Precipitación Níquel Total, %		
	Dosis, mg/L		
	100	200	300
AC 851 - SNF	7,48	5,39	13,16
VAPEN FLOC	3,33	12,71	14,85
VAPEN FLOC PP	2,41	15,19	4,02
Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio	0	17,28	3,14
Chematek - Policloruro de Aluminio	7,38	1,86	0
Sulfato de Aluminio	8,23	14,98	8,23

En sentido general todos los coagulantes tuvieron un mal desempeño en cuanto a la precipitación de níquel total, de igual manera con el níquel disuelto. Ver tabla 6.

**Tabla 6**  
Precipitación de níquel disuelto en función de las dosis de coagulante con el efluente previamente destilado

Coagulantes	Precipitación Níquel Disuelto, %		
	Dosis, mg/L		
	100	200	300
AC 851 - SNF	0,51	9,85	1,75
VAPEN FLOC	10,29	3,43	6,91
VAPEN FLOC PP	1,04	0,00	0,00
Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio	4,88	11,79	0,00
Chematek - Policloruro de Aluminio	7,35	10,70	0,00
Sulfato de Aluminio	13,94	0,00	0,00

**Evaluación del efecto de la adición de coagulante y floculante en el efluente pre-destilado con cal hidratada**

La pre-destilación se realizó al efluente con una previa dosificación de cal hidratada. Se utilizó una plancha de calentamiento, un tiempo de retención de 25 minutos y una temperatura de 90 °C. Se obtuvo como resultado una destilación entre 14,79 y 24,08 % del amoníaco presente en el efluente, promediando 21,20 %.

En la tabla 7 se muestra el resumen de la precipitación de níquel total obtenida al variar las dosis de cada coagulante y cal hidratada.

**Tabla 7**  
Precipitación de níquel total en función de las dosis de coagulante y cal hidratada con el efluente previamente destilado

Coagulantes	Precipitación Níquel Total, %					
	Dosis, mg/L					
	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal
	100	50	200	100	300	150
AC 851 - SNF	7,91		16,27		0	
VAPEN FLOC	8,19		11,00		10,11	
VAPEN FLOC PP	0		1,43		1,08	
Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio	8,19		10,43		12,09	
Chematek - Policloruro de Aluminio	16,37		20,39		5,76	
Sulfato de Aluminio	28,40		12,92		2,99	

De igual manera en sentido general todos los coagulantes tuvieron un mal desempeño en cuanto a la precipitación de níquel total y el disuelto. Ver tabla 8.

**Tabla 8**

Precipitación de níquel disuelto en función de las dosis de coagulante y cal hidratada con el efluente previamente destilado

Coagulantes	Precipitación Níquel disuelto, %					
	Dosis, mg/L					
	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal	Coagulante	Cal
	100	50	200	100	300	150
AC 851 - SNF	7,91		16,27		0	
VAPEN FLOC	8,19		11,00		10,11	
VAPEN FLOC PP	0		1,43		1,08	
Chematek - Hidroxicloruro de Aluminio	8,19		10,43		12,09	
Chematek - Policloruro de Aluminio	16,37		20,39		5,76	
Sulfato de Aluminio	28,40		12,92		2,99	

## CONCLUSIONES

- Los mejores resultados de precipitación de níquel total y de níquel disuelto, 91,70 y 88,67 % respectivamente, se lograron con el empleo del sulfato de aluminio a una dosis de 300 mg/L y cal hidratada a 150 mg/L.
- Con el empleo de la pre-destilación del efluente no se lograron buenos resultados de coagulación para ninguno de los coagulantes empleados.

## BIBLIOGRAFIA

1. ALFONSO OLMO, Esteban; CAMPORREDONDO, Carmen. *Recuperación por sorción de Ni y Co de licores residuales de la planta de recuperación de amoniaco de Nicaro*. Informe inédito. Centro de investigaciones y proyectos para la industria minero metalúrgica. La Habana, 1985.
2. BENNETT, Paul. *Technical Manual. Association of Water Technologies, Inc.* USA, 2009. 862 p.
3. COX R, Charles. *Práctica y vigilancia de las operaciones del tratamiento del agua*. La Habana: Editorial Científico-Técnica, 1979. 424 p.
4. ECG. *Instrucción técnica de operación para la prueba de jarra en el laboratorio químico de agua y microbiología*. Moa. 2013.
5. GLEGG. *Water Treatment handbook*. UK, 2002. 889 p.
6. MARTICORENA COLLAZO, José. *Manual técnico para operadores de tratamiento de aguas*. La Habana: Editorial Científico-Técnica, 1975. 134 p.

7. MENÉS VUELTA, Gerardo; RIVAS ROMERO, Sorangel. *Tratamiento por coagulación-floculación del efluente del sedimentador de carbonato de la ECG. Etapa 02*. Informe inédito. Centro de Investigaciones del Níquel. Moa, 2015. 12 p.
8. PÉREZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Abastecimiento de agua. Tema 6 Coagulación y Floculación*. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia, 2011.
9. SNF FLOERGER. *Drinking water production*. Francia. 2014. 30 p.
10. STRAUSS SHELDON, D. *Boiler water treatment for low and moderate, pressure plant*. Reporte Especial. New York, 1987. 16 p.

Recibido: Noviembre 2016  
Aprobado: Marzo 2017

*Ing. Sorangel Rivas-Romero*. Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ). Cuba.  
srivas@cil.moa.minem.cu