

Modelo y diseño de tren de lavado de gases provenientes de la incineración de residuos

Rodríguez Rosa, A.¹, Echegaray Marcelo, E.¹, Castro María¹, Palacios Carlos¹, Hektor Klaus¹, Udaquiola Stella¹

Fecha de recepción: 29 de enero de 2008 – Fecha de aceptación: 10 de diciembre de 2008

RESUMEN

Debido a sus efectos nocivos, el abatimiento de las emisiones de contaminantes gaseosos adquiere una importancia cada día mayor. Con el objeto de disminuir la emisión de los mismos, se diseñó y construyó un tren de lavado de gases provenientes de un incinerador de residuos sólidos instalado en el Parque Industrial de la Provincia de San Juan, Argentina. Dicho tren de lavado está compuesto por un enfriador y un equipo lavador de gases, tipo spray. El enfriador cumple una doble función; por un lado enfría los gases hasta la temperatura necesaria para que se produzcan las reacciones de absorción de contaminantes en el lavador, y por otro, se produce una absorción parcial de gases ácidos (como: HCl, HF y SO₂) y eliminación parcial de cenizas volantes. La corriente gaseosa ingresa a la torre de lavado por la parte inferior de la columna mientras que una solución alcalina ingresa por la parte superior, siendo distribuida uniformemente por un banco de rociadores. La altura de la columna asegura la eliminación de los contaminantes gaseosos ácidos, hasta cumplir con las normativas vigentes. La solución alcalina usada es una solución de NaHCO₃, debido a que las sales sódicas presentan mayor solubilidad, reactividad y rendimiento; además los productos de las reacciones presentan alta solubilidad facilitando su tratamiento posterior. Los resultados obtenidos en el monitoreo realizado por la Subsecretaría de Medio Ambiente dependiente del Gobierno Provincial indican un eficiente funcionamiento del equipo diseñado.

Palabras claves: Incineración, enfriamiento, lavador de gases, absorción de SO₂, control de polución de aire.

Model and design of a scrubber system of gases from wastes incineration

ABSTRACT

Owing to its various deleterious effects, abatement of pollutants gases from point sources assumes significant importance over the years. In order to decrease their emissions, the design and construction of an acid gas removal from a solid waste incinerator was developed. The incinerator is located in the San Juan Industrial Park, Argentina. This system is formed by a quench and a scrubber, which consists on a spray tower. The quench has a double function: to cool the gases to the absorption temperature at the scrubber, as well as to absorb acid gases (as: HCl, HF and SO₂) and to eliminate the fly ash partially. The gaseous flow enters to the spray tower by the bottom, while an alkali solution is sprayed from the upper section. The height of the column was calculated in order to assure an efficient elimination of the acid gas pollutants, to fulfill regulatory schemes. The alkali solution used is a NaHCO₃ solution, because the sodium salts present bigger solubility, reactivity and performance; the products of the reactions also present high solubility facilitating their later treatment. The monitoring carried out by the Environmental Sub Secretary of the Provincial Government; indicate an efficient operation of the designed system.

Keywords: Incineration, quench, scrubber, SO₂ absorption, Air pollution control

¹ Instituto de Ingeniería Química- Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Responsable del artículo es la primera autora con E-mail: rrodri@unsj.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La incineración es un proceso por el cual se logra la destrucción de los contaminantes orgánicos de un residuo por calentamiento, en atmósfera oxidante, a altas temperaturas. El resultado es la conversión del residuo en otro material de menor volumen y peligrosidad (cenizas). La incineración ha sido objeto de críticas desde el punto de vista medioambiental debido a que, por combustión incompleta, puede formar sustancias muy tóxicas, tales como las dioxinas, furanos y metales pesados, que pueden ser emitidos por estas instalaciones. Las disposiciones y normas legales que limitan las emisiones de los incineradores son cada vez más estrictas, de modo que, para conseguir su cumplimiento, ha sido necesario desarrollar nuevas tecnologías para el sistema de combustión y para los sistemas de depuración de gases.

El análisis elemental de la materia del residuo da la composición de C, H, O, N, S, P y halógenos. La presencia de compuestos orgánicos halogenados producirá HCl y Cl₂, HF y HBr. El N y S conducen a la formación de compuestos como NO_x y SO₂, también de carácter ácido. La existencia de Cl₂, junto a determinadas condiciones de operación, puede generar por reacciones secundarias la formación de dioxinas y furanos, cuando la combustión es incompleta, que exigen su destrucción total debido a su carácter cancerígeno y mutágeno. Por otro lado el proceso de incineración produce material sólido como lo son las cenizas y el material particulado que acompaña al efluente gaseoso.

Dentro de los contaminantes gaseosos producidos, la disminución de las emisiones de gases ácidos adquiere cada día una importancia significativa debido a los efectos perjudiciales sobre los sistemas vivos. Una gran cantidad de tecnología sobre lavadores de gases se ha desarrollado de acuerdo a los requerimientos de las diferentes industrias y procesos de producción como así también de la legislación mundial existente. Los lavadores con columnas internas han sido reemplazados por torres spray debido a que estas últimas tienen mayores ventajas (Bandyopadhyay y Biswas, 2008).

Teniendo en cuenta la descripción matemática de los procesos de absorción en depuradores de gases, se pueden mencionar los siguientes trabajos encontrados en bibliografía:

Schmidt y Stichlmair (1991) modelaron la absorción de SO₂ en depuradores de gases tipo spray en corriente usando NaOH como uno de los reactivos, estudiando los efectos de distintas variables operativas diferentes sobre el número de unidades de

transferencia para el propósito para diseñando. Valores experimentales fueron aproximados en forma aceptable usando el modelo desarrollado.

Brogren y Hans (1997) desarrollaron un modelo sobre la base de la teoría de penetración para calcular velocidad de absorción dinámica de SO₂ en una gotita de solución de caliza. El modelo incluye tanto reacciones de equilibrio instantáneo como reacciones con velocidades finitas; la disolución de la caliza, la oxidación de sulfitos, la cristalización de yeso y la reacción de hidrólisis de CO₂. El modelo aclaró varias facetas de la transferencia masa reactiva; lo cual se usó para cuantificar la transferencia masa dentro de un depurador de aire de spray y calcular el impacto de las reacciones con velocidad finita de absorción de SO₂.

Pettersson y colaboradores (1998), desarrollaron un modelo simplificado para un depurador de limpieza de gases húmedo que fue verificado con un depurador tipo spray en una planta de incineración de residuos de Dinamarca. La eficiencia de remoción de SO₂ conseguida fue de aproximadamente el 90 % usando 2.5 - 20 kmol/m³ de NaOH como solución alcalina, para una concentración de entrada de SO₂ que varió entre de 100 a 500 ppm. Las experiencias realizadas por estos investigadores revelaron que la concentración inicial de SO₂ no influyó en la eficiencia de remoción de este contaminante.

Hay y otros (2004), publicaron la retención de SO₂ realizada por varios depuradores tipo spray usando una solución caústica en plantas cuya corriente gaseosa de salida contenía una concentración de SO₂ de aproximadamente 500 ppm. Se observó una alta eficiencia de remoción (aproximadamente del 95 % a un pH igual a 11). Los procesos húmedos de desulfurización de gases, donde se usa piedra caliza / yeso presentaron una alta eficiencia de remoción de SO₂, SO₃ y partículas finas.

En el presente trabajo se describe el diseño de un tren de lavado del efluente gaseoso proveniente de un horno de incineración de residuos. El mismo consiste en un enfriador y un depurador de gases ácidos. Las dimensiones de cada uno de los componentes del tren de lavado fueron calculadas planteando ecuaciones de balances de masa y energía.

METODOLOGÍA

En esta sección, en primer lugar, se realizará la descripción del incinerador de residuos para el cual se diseñó el tren de lavado de gases ácidos. Posteriormente, se expondrán los cálculos realizados a fin de determinar el requerimiento de agua del

enfriador necesaria para enfriar los gases, y la altura del lavador suficiente para obtener la retención de SO_2 deseada presentes en los gases de combustión.

Descripción del incinerador de residuos

El incinerador con el cual se trabajó para realizar el diseño del tren de lavado de gases es un horno LINDBERG, Industria Argentina, para la incineración pirolítica de residuos industriales sólidos (Figura 1). Con cámara primaria cilíndrica vertical, cámara secundaria (de recombustión) cilíndrica horizontal, diseñada para operar a 1200°C con 2 segundos de tiempo de residencia de los gases.

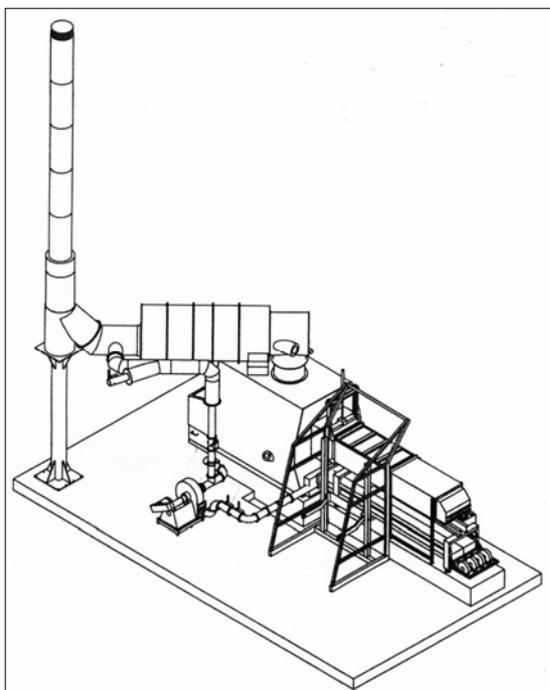


Figura 1. Horno incinerador de doble cámara.

El proceso de combustión se divide en dos fases:

- En la cámara primaria se quema con defecto de aire (una velocidad baja de aire minimiza el arrastre de partículas al disminuir las turbulencias). A la cámara secundaria suben humos y productos pirolíticos. La temperatura de operación está entre $800 - 850^\circ\text{C}$.
- En la cámara secundaria se quema con exceso de aire del 100 al 200% para completar la combustión. Su temperatura de operación es de 1200°C .

Este horno se utiliza para incinerar tierras contaminadas con hidrocarburos, (como así también residuos municipales) filtros, plásticos, es decir residuos sólidos que difieren en su naturaleza. A fin de lograr un óptimo funcionamiento se estableció la proporción de tierra contaminada y de material sólido

diverso que debía ser alimentada en cada carga del incinerador. Con esto se consigue que el horno trabaje en las temperaturas adecuadas disminuyendo así la formación de dioxinas que también se ve favorecida si la proporción de plásticos es excesiva.

Descripción del tren de lavado de gases

Los gases provenientes del horno ingresan al enfriador, el cual cumple varias funciones; por un lado enfría los gases hasta la temperatura necesaria para que se produzcan las reacciones de absorción de contaminantes en el lavador; se produce una absorción parcial de gases ácidos (HCl , HF , SO_2 etc) y además se elimina el material particulado que puede estar presente en los gases de salida del incinerador.

El efluente gaseoso, una vez enfriado, ingresa al equipo lavador de gases que está constituido por una columna tipo spray.

La corriente gaseosa ingresa por la parte inferior de la columna mientras que la solución de lavado ingresa por la parte superior de la misma en forma de lluvia, siendo distribuida uniformemente por un banco de rociadores. Esto permite un óptimo contacto entre las fases gaseosa y líquida lográndose así una alta eficiencia del proceso. La solución de lavado utilizada en este caso fue una solución de NaHCO_3

La altura de la columna se calculó de forma tal que los gases permanezcan en la columna el tiempo necesario para dar lugar a las reacciones de absorción.

Los gases limpios salen por la parte superior de la columna y son impulsados por un ventilador hacia la chimenea, por donde salen a la atmósfera.

La solución de lavado se prepara en un tanque con una concentración determinada y luego es bombeada a los rociadores que se encuentran en la parte superior de la columna lavadora. La solución agotada es retirada por la parte inferior de la columna y enviada a una pileta para su tratamiento posterior. Parte de esta solución una vez acondicionada es reutilizada y parte se desecha.

Las corrientes líquidas provenientes del enfriador se mezclan con las del lavador y son tratadas en una pileta construida para tal fin.

Requerimientos de agua del enfriador

Los gases calientes provenientes del horno a una temperatura aproximada de 500°C (T_H), deben ser enfriados hasta alcanzar el valor adecuado (150°C) para que se produzcan las reacciones de absorción en el lavador (T_S). Esto se logra haciendo pasar el

efluente gaseoso a través de una lluvia de agua provista por una serie de rociadores en el enfriador. Como se mencionó anteriormente además de lograr el descenso de la temperatura de los gases, parte del material particulado es retenido por las gotas de agua. El calor que es necesario extraer a los gases para descender su temperatura está dado por:

$$Q_{gas} = \int_{T_H}^{T_S} N(c_p)_{mez} dT \quad (1)$$

En donde la capacidad calorífica de la mezcla de gases se calcula según la siguiente ecuación teniendo en cuenta las fracciones molares de cada uno de los constituyentes en el efluente gaseoso:

$$(c_p)_{mez} = \sum_{i=1}^c y_j c_{pj} \quad (2)$$

Este calor es absorbido por el agua de los rociadores en donde parte de ella pasa al estado vapor, por medio de la siguiente ecuación pueden calcularse los requerimientos del agua de enfriamiento:

$$Q_{gas} = Q_{H2O} = \int_{T_{agua}}^{T_{eb}} N_{H2O} \cdot c_{H2O} dT + N_{H2O_{evap}} \cdot \Delta \tilde{H}_{H2O}^{vap} \quad (3)$$

Este caudal de agua es distribuido a lo largo del enfriador a través de una serie de rociadores. La temperatura de los gases de salida de este dispositivo de enfriamiento es medida con el fin de variar el caudal de agua que se envía a los rociadores teniendo en cuenta la temperatura deseada de los gases a la salida del mismo.

En la Figura 2 puede observarse una fotografía del dispositivo diseñado. El mismo presenta una pequeña

Se plantearon las siguientes ecuaciones:

$$\frac{F}{P - p_{SO_2}^b} \frac{dp_{SO_2}^b}{dz} = -N_{SO_2} \Big|_{y=0} \cdot a_v \cdot \Omega \quad \text{Balance de masa para el SO}_2 \text{ en la fase gas} \quad (4)$$

$$\frac{dF}{dz} = -N_{SO_2} \Big|_{y=0} \cdot a_v \cdot \Omega \quad \text{Flujo molar total en la fase gas} \quad (5)$$

$$N_{SO_2} \Big|_{y=0} = C_{SO_2}^i \frac{\sqrt{k \cdot D_{SO_2}}}{\tanh \left(\frac{1}{k_{L,SO_2}} \sqrt{k \cdot D_{SO_2}} \right)} \quad \text{Flujo interfacial de SO}_2 \text{ por unidad de área gas-líquido} \quad (6)$$

$$C_{SO_2}^i = H \cdot p_{SO_2}^i \quad \text{Equilibrio gas-líquido de SO}_2 \text{ en la interfase} \quad (7)$$

inclinación, cuyo objetivo es que los condensados y lodos formados puedan ser recogidos para su posterior tratamiento.

Cálculo de la altura mínima del lavador

Debido a que la concentración de HCl en el efluente gaseoso no es importante, gran parte de éste es retenido en el enfriador, de esta forma es el SO₂ el contaminante principal que será retenido en el lavador. Con el objetivo de calcular la altura de la columna, se trabajó con una concentración de SO₂ presente en los gases provenientes del enfriador variable, entre 1000 y 1500 ppm. Se aplicó un modelo basado en la teoría de la doble película que represente el sistema gas-líquido (Doraiswamy and Sharma, 1984).



Figura 2. Enfriador instalado en el incinerador.

altura de la torre. Como puede observarse para una altura de aproximadamente 1.5 m se obtiene un alto porcentaje de remoción del contaminante. Con base en este modelo puede calcularse la altura de la torre

de acuerdo a la concentración de contaminante requerida en el efluente que sale del lavador.

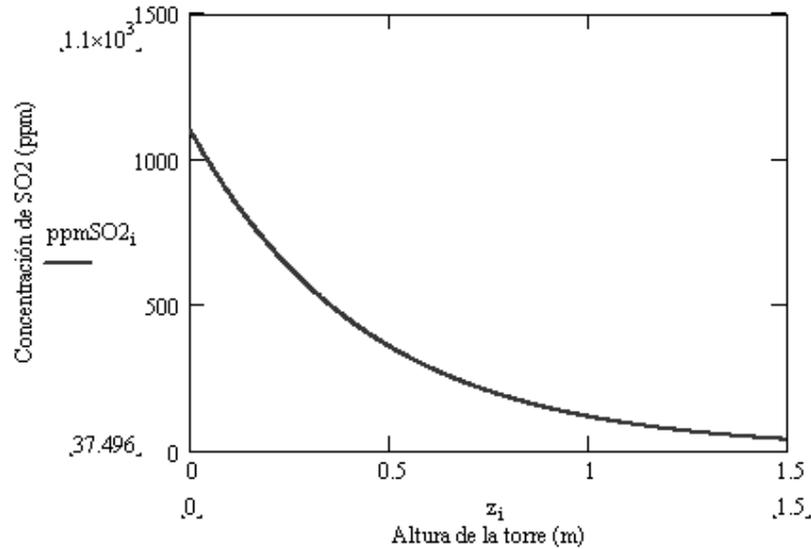


Figura 3. Perfil de la concentración de SO_2 en la columna.

Teniendo en cuenta la estequiometría de las reacciones puede estimarse mediante este programa la variación de la concentración de la solución empleada para retener los gases ácidos que circulará en contracorriente con el gas. La concentración de la solución de NaHCO_3 se establece con base en la solubilidad de este reactivo y a los requerimientos del mismo dado por el contenido del contaminante en el efluente gaseoso. En la Figura 4 puede observarse la

variación de la concentración de la solución de lavado que ingresa por la parte superior de la columna.

Cabe hacer notar que si bien las dimensiones de la columna que indica el modelo son las necesarias para obtener el porcentaje de remoción requerido, dado que la empresa contaba con una columna, ésta se utilizó para la construcción del lavador aunque se encontraba sobredimensionada.

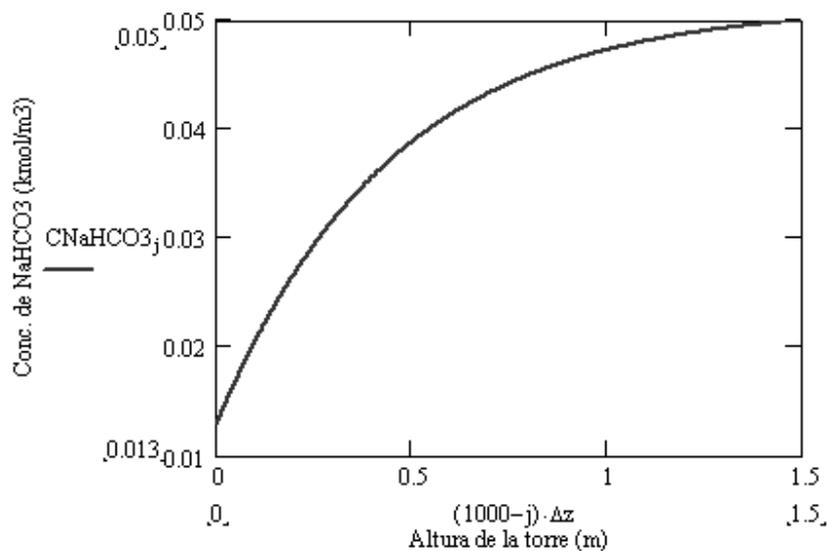


Figura 4. Variación de la concentración de la solución de lavado a lo largo de la columna.

En la Figura 5 puede observarse la columna lavadora de gases con su entrada del efluente proveniente del enfriador ubicado en el techo de la planta.

En el enfriador, los efluentes líquidos de características ácidas con cierta cantidad de lodos debido al material particulado que es retenido, salen y se juntan con el efluente proveniente del lavador que tiene características alcalinas produciéndose en cierta

medida un proceso de neutralización (Ver Figura 6).

Este efluente es enviado posteriormente a una pileta donde se produce la sedimentación de los sólidos contenidos en él. Si es necesario, se realiza una corrección de pH del líquido proveniente de los sedimentadores con el fin de ser reutilizado para el riego del predio de la planta.



Figura 5. Fotografía de la torre lavadora de gases.

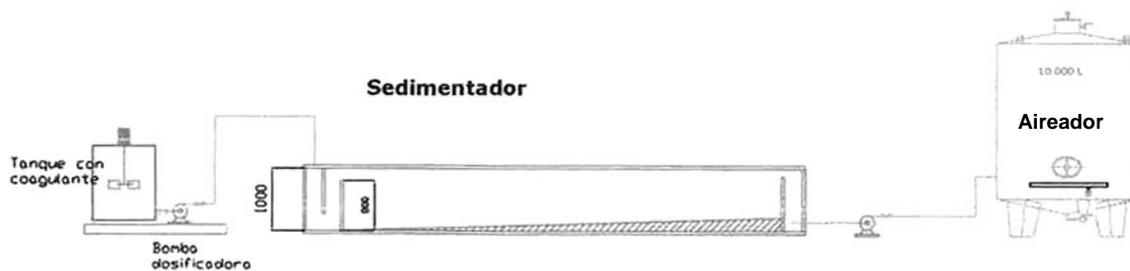


Figura 6. Esquema del sistema de tratamiento del efluente líquido proveniente del lavador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efluentes gaseosos provenientes de la planta incineradora, una vez instalado el tren de lavado de gases, fueron analizados por la Subsecretaría de Medioambiente y Política Ambiental de la Provincia

de San Juan, organismo contralor en la provincia de San Juan, Argentina. En la Tabla 1 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos en la realización de estos análisis.

Tabla 1. Concentraciones de distintos contaminantes emitidos en la corriente gaseosa a la salida del sistema lavador de gases. Valores límites fijados por la legislación vigente en la provincia de San Juan, Argentina.

Parámetro analizado	Concentraciones a la salida del sistema lavador de gases (mg/dsm ³)	Concentraciones límites (mg/dsm ³)
Material Particulado	7.2	250
NOx	89.5	450
SO ₂	5	500
CO	0.4	100
HCl y Cl ₂	6	460
VOC-SVOC	0.08	
Hg Total	<0.001	
Pb	0.07	10
As	<0.001	

Si bien existen varias opciones de tecnología para llevar a cabo el enfriamiento de los gases, el sistema elegido tiene ventajas tales como el íntimo contacto entre el gas y el agua que favorece el intercambio calórico lo que resulta en un menor caudal de agua utilizado para tal fin.

Teniendo en cuenta el dispositivo utilizado para el lavado de gases, se optó por una columna tipo spray debido a que las reacciones que se producen son bastante rápidas y si bien, las columnas rellenas presentan mayor eficiencia en el proceso de transferencia, requieren una mayor inversión que en este caso, sería injustificada. Además, pueden tratar un gran volumen de gas, ofrecen un salto de presión mínimo, comparando con cualquier otro dispositivo de contacto gas – líquido (Amitava and Manindra, 2007).

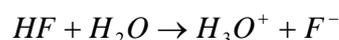
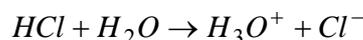
La selección de un líquido absorbente apropiado plantea un problema muy complicado y tiene una gran importancia para el diseño de proceso también. Muchos de los problemas experimentados en las instalaciones son resultado de la selección inapropiada del absorbedor (Hay et al., 2004). Por ejemplo, una lechada de piedra caliza posee una buena eficiencia en la retención de SO₂ generado en un combustor de carbón, sin embargo, esto no es así en los procesos metalúrgicos debido a las altas fluctuaciones producidas en la generación de este contaminante.

Procesos comerciales comunes utilizan una combinación de cal / piedra caliza. Una lechada de cal

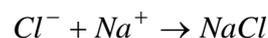
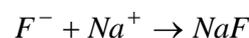
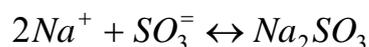
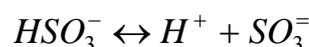
y piedra caliza son apropiadas para concentraciones relativamente bajas de SO₂ (< 100 - 5000 ppm), obteniéndose una eficiencia en el proceso de retención entre el 90 - 95 %. Cuando las concentraciones de SO₂ son mayores (<100 - 150000 ppm), se pueden regenerar el residuo de un proceso alcalino dual, mediante la reacción con Ca(OH)₂, fuera del circuito de lavado, con el objeto de minimizar los costos. La eficiencia de retención que puede ser brindada por el proceso de álcali doble es también muy alta (> 99 %). La reducción de la concentración de SO₂ debajo de 5 ppm (valor de límite de umbral de SO₂) puede ser conseguida con controles apropiados sobre pH, la fuerza de iónica y la velocidad de circulación del líquido alcalino.

En general, como líquido de lavado se puede emplear una solución de algún reactivo con características alcalinas en agua. Dentro de los reactivos pueden utilizarse NaOH, NaHCO₃, Na₂CO₃, Ca(OH)₂, Ca(HCO₃)₂ etc. La elección del mismo dependerá de distintos factores como reactividad, solubilidad en agua, costo, propiedades corrosivas, solubilidad de los productos de reacción etc.

Los gases ácidos son retenidos por el agua empleada para el enfriamiento de la corriente gaseosa en el enfriador de acuerdo a las siguientes reacciones:



La solución de lavado en el lavador produce la absorción de los gases remanentes, se muestran a continuación algunas de las reacciones que se llevan a cabo empleando por ejemplo un reactivo de características sódicas:



Los compuestos sódicos presentan mayor solubilidad y son más reactivos, obteniéndose mejores rendimientos, además los productos de las reacciones presentan alta solubilidad lo que facilita su tratamiento posterior. Los reactivos cálcicos son más económicos pero presentan una menor solubilidad en agua, a su vez los productos resultantes de las reacciones en el lavador también tienen baja solubilidad. Debido a lo anteriormente expuesto, y al

bajo costo en mercado, se optó por trabajar con una solución de NaHCO_3 .

El diámetro de la columna utilizada fue de 1.3 m y su altura de 5 m y para un caudal aproximado de 1000 m^3/h de la corriente de gas entrante el tiempo de contacto entre éste y la solución de lavado es de aproximadamente 20 segundos. El contenido de SO_2 del efluente gaseoso que ingresa a la torre es de aproximadamente 1100 ppm. Utilizando un caudal de 1.7 l/s de solución lavadora de concentración 0.05 M de NaHCO_3 se obtiene una eficiencia de remoción del 96% a 1.5 m de altura de la torre, como puede verse en la Figura 3. Como se observa, la eficiencia de remoción de SO_2 es alcanzada a una altura mucho menor que la de la torre utilizada, sin embargo ésta fue usada para disminuir costos, ya que ésta estaba en existencia en la empresa beneficiaria de dicho diseño al momento de construir el lavador.

CONCLUSIONES

La retención de los contaminantes emitidos en la corriente gaseosa de salida de un combustor de residuos tiene una gran importancia debido a los efectos nocivos sobre sistemas vivientes de cada uno de éstos. Las diferentes tecnologías han evolucionado a partir de los requisitos de las regulaciones actuales.

Así el atomizador utilizado para introducir la solución alcalina en el lavador, es capaz de producir las gotitas más finas en la respectiva velocidad muy alta sin

sacrificar la uniformidad de spray, lo cual aumenta la eficiencia del sistema.

Teniendo en cuenta la solución absorbente, se optó por trabajar con una solución de NaHCO_3 , ya que los compuestos sódicos no sólo presentan mayor solubilidad sino también son más reactivos obteniéndose mayores rendimientos; además los productos de las reacciones presentan alta solubilidad lo que facilita su tratamiento posterior. Por otra parte el NaHCO_3 tiene un bajo costo en el mercado, lo que incrementa las ventajas de su uso.

De acuerdo a los resultados de los análisis realizados al efluente gaseoso proveniente de la planta incineradora de residuos realizados por la Subsecretaría de Medioambiente y Política Ambiental de la Provincia de San Juan, los contaminantes presentes se encuentran por debajo de los límites establecidos por la legislación vigente.

De estos resultados puede concluirse que las condiciones operativas y de carga del horno juntamente con el tren de lavado construido han cumplido con los objetivos fijados.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece muy especialmente el aporte intelectual y la ayuda proporcionada durante toda la ejecución de este trabajo al Dr. Rer. Nat. Klaus Friedirch Hektor, actualmente fallecido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bandyopadhyay A., Biswas M. (2008) Critical flow atomizer in SO_2 spray scrubbing. *Chemical Engineering Journal*, V 139, I 1, 29-41.
- De Nevers, N. (1997). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*, McGraw-Hill, México.
- Hektor, K., Udaquiola S., Rodríguez R., Echegaray M. (2002). Metales Pesados en la Incineración de Residuos Patológicos. *Revista de la Asociación de Ingenieros Químicos del Uruguay*.
- Hektor K., Udaquiola S. (1997). Evaluación Técnica del Incinerador de Residuos Patológicos del Hospital Dr. Guillermo Rawson, *Primer Congreso Ambiental '97*, San Juan, Argentina.
- Ebrahimi S., Picioreanu C., Kleerebezem R., Heijnen J., Van Loosdrecht M. (2003). Rate- based modelling of SO_2 absorption into aqueous $\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$ solutions accompanied by the desorption of CO_2 . *Chemical Engineering Science*, 58, 3589.
- Schmidt B., Stichlmair K. (1991). Two-phase flow and mass transfer in scrubbers. *Chem. Eng. Technol.* 14: 162–166.
- Brogren C., Hans T. (1997). Modeling the absorption of SO_2 in a spray scrubber using the penetration theory, *Chem. Eng. Sci.* 52: 3085–3099.

Rodríguez Rosa, A. et al. / Ingeniería 12-3 (2008) 5-15

Pettersson M., Nilsson B., Birgersson J., Simonson E. (1998). Analysis and validation of a simplified model of a wet flue gas cleaning system, J. Proc. Cont. 8: 69–76.

Hay S., Porretta F., Wiggins B. (2004). Design and Start-up of Acid Plant Tail Gas Scrubber, New South Wales, Australia, Disponible en <http://www.hatch.ca/non-ferrous/articles/design-startup.pdf>.

Este documento se debe citar como:

Rodríguez Rosa, A., Echegaray Marcelo, E., Castro María, Palacios Carlos, Hektor Klaus, Udaquiola Stella. (2008). **Modelo y diseño de tren de lavado de gases provenientes de la incineración de residuos.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-3, pp. 5-14, ISSN: 1665-529X