



## SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INDUSTRIA Y ENERGÍA

**Catalizadores agotados de la Fábrica Patricio Lumumba. Fuente potencial de  
vanadio mediante procesamiento químico**  
**Spent catalysts from the Patricio Lumumba Factory. Potential source of vanadium  
by chemical processing**

**Laura Ailin Perdomo Gómez<sup>1</sup>, Lorenzo Perdomo González<sup>2</sup>, Rafael Quintana  
Puchol<sup>3</sup>, Ángel Mollineda Trujillo<sup>4</sup>, Amaury Palacio Rodríguez<sup>5</sup>, Dayana Rabassa  
Rabassa<sup>6</sup>, Evangelina García Peña<sup>7</sup>**

1- Laura Ailin Perdomo Gómez. Centro de Estudios de Química Aplicada, UCLV, Cuba.

[laperdomo@uclv.cu](mailto:laperdomo@uclv.cu)

2- Lorenzo Perdomo González. Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Cuba.

[lperdomo@uclv.edu.cu](mailto:lperdomo@uclv.edu.cu)

3- Rafael Quintana Puchol. Departamento de Licenciatura en Química, UCLV, Cuba.

[rquin@uclv.edu.cu](mailto:rquin@uclv.edu.cu)

4- Ángel Mollineda Trujillo. Centro de Investigaciones Agropecuarias, UCLV, Cuba.

[amollineda@uclv.cu](mailto:amollineda@uclv.cu)

5- Amaury Palacio Rodríguez. Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Cuba.

[ampalacio@uclv.cu](mailto:ampalacio@uclv.cu)

6- Dayana Rabassa Rabassa. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba.

[dayana@gestion.ceac.cu](mailto:dayana@gestion.ceac.cu)

7- Evangelina García Peña. Departamento de Ingeniería Mecánica, UCLV, Cuba.

[egpena@uclv.cu](mailto:egpena@uclv.cu)

### Resumen

**Problemática:** En la producción de ácido sulfúrico por el método de contacto se utilizan catalizadores con más de 4 % de pentóxido de vanadio, los cuales salen de servicio una vez agotados totalmente y, de acuerdo a regulaciones medioambientales, deben ser almacenados por tiempo indefinido. En la Fábrica Sulfometales Patricio Lumumba, la que actualmente no trabaja, existen depósitos de residuos catalíticos almacenados en condiciones inadecuadas, debido a la ausencia de una tecnología de procesamiento de los mismos.



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

**Objetivo(s):** El presente trabajo tiene como objetivo estudiar mediante procesamiento químico la recuperación del vanadio contenido en los catalizadores agotados procedentes de la Fábrica Patricio Lumumba.

**Metodología:** Se realizó un diseño de experimentos factorial completo ( $2^3$ ) donde se analizaron como variables independientes: temperatura, relación sólido/líquido y concentración del ácido sulfúrico y como variables dependientes: concentración de vanadio y rendimiento de la lixiviación.

**Resultados y discusión:** El procesamiento permitió obtener una fase líquida compuesta por los sulfatos de los metales lixiviados con ácido sulfúrico las que tienen concentraciones de vanadio entre 1 448 y 3 730 mg/L, lográndose un rendimiento de la lixiviación entre el 75 y 97 %.

**Conclusiones:** El procedimiento evaluado permite procesar un residual industrial que se encuentra almacenado en instalaciones en desuso. A partir de la fase líquida obtenida puede recuperarse el vanadio para su posterior procesamiento y aprovechamiento industrial, evitando su confinamiento. El residual sólido generado durante el proceso no es contaminante, contribuyendo a la protección del medio ambiente.

**Abstract**

**Problem:** *In the production of sulfuric acid by the contact method, catalysts with more than 4 % vanadium pentoxide are used, which go out of service once completely exhausted and, according to environmental regulations, must be stored indefinitely. At the Patricio Lumumba Sulfometales Factory, which is currently not working, there are deposits of catalytic waste stored in inadequate conditions, due to the absence of a technology to process them.*

**Objective(s):** *The present work aims to study the recovery of vanadium contained in spent catalysts from the Patricio Lumumba Factory through chemical processing.*

**Methodology:** *A complete factorial design of experiments was carry out ( $2^3$ ) where the following were analyzed as independent variables: temperature, solid/liquid ratio and sulfuric acid concentration and as dependent variables: vanadium concentration and leaching performance.*

**Results and discussion:** *The processing allowed obtaining a liquid phase composed of metal sulfates leached with sulfuric acid, which have vanadium concentrations between 1,448 and 3,730 mg/L, achieving a leaching yield between 75 and 97 %.*



*Conclusions: The evaluated procedure allows processing an industrial waste that is stored in disused installations. Vanadium can be recover from the liquid phase obtained for further processing and industrial use, avoiding its confinement. The solid waste generated during the process is not polluting, contributing to the protection of the environment.*

**Palabras Clave:** Catalizadores agotados; Lixiviación ácida; Ácido sulfúrico; Recuperación de vanadio.

**Keywords:** *Catalysts spent; Acid leaching; Sulfuric acid; Vanadium recovery.*

## 1. Introducción

El ácido sulfúrico es un producto industrial de múltiples usos; el volumen de su producción y consumo proporcionan un índice aproximado de la actividad general industrial y de desarrollo de un país. En la producción de ácido sulfúrico por el método de contacto se utiliza un catalizador de pentóxido de vanadio, que permite la transformación del SO<sub>2</sub> en SO<sub>3</sub>, debido a la reacción (Baran, 2017):



Con el paso del tiempo el catalizador de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se agota (envenenamiento) por lo que debe salir de servicio, y es considerado un desecho peligroso según el Convenio de Basilea (Convenio de Basilea, 1989) y la Ley N° 81 del Medio Ambiente (Ley No. 81, 1997); resultando obligatorio almacenarlo por tiempo indefinido, incrementándose los costos y la cantidad de residual almacenado (Alonso et al., 2008).

En la CEN de Juragúa de Cienfuegos fue creado el Confinatorio Nacional de Desechos Peligrosos con el objetivo de confinar los residuos peligrosos existentes en el país, entre los cuales se encuentran los catalizadores agotados dada la ausencia de un procedimiento adecuado para su procesamiento (ACN, 2015).

En Cuba, fue inaugurada en 1961 la fábrica Sulfometales Patricio Lumumba, en Santa Lucía, Pinar del Río, en la que se producía ácido sulfúrico por el método de contacto. Esta planta actualmente no trabaja, pero aún almacena en sus instalaciones aproximadamente 110 t de residuales catalíticos, los cuales pudieran ser usados como fuente de vanadio (Confinatorio Nacional, 2018).

Los catalizadores agotados pueden contener entre el 3 y 10 % de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, resultando una fuente importante de vanadio ( $\geq 1,68$  % de V), metal estratégico del cual no se reportan



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

yacimientos en Cuba, encontrándose pocos depósitos en los que se encuentre concentrado, siendo obtenido a partir de diferentes menas y residuales industriales (González, 2012, Marinov and Paunova, 2003). El vanadio es considerado un metal estratégico en el mercado internacional, encontrándose en la lista de materias primas críticas (Petranikova 2020).

Resulta entonces importante evaluar métodos que permitan recuperar el vanadio presente en los catalizadores, de modo que estos no constituyan un riesgo al medio ambiente y que el producto recuperado pueda ser usado para otros fines. Para la recuperación del vanadio se pueden utilizar métodos pirometalúrgicos y métodos hidrometalúrgicos donde la elección de uno u otro método depende de factores técnicos, económicos y del destino posterior de los productos obtenidos. Han sido numerosos los estudios relacionados con la recuperación de vanadio de catalizadores agotados mediante lixiviación, evaluándose la extracción utilizando diferentes agentes lixiviantes: ácidos, básicos y orgánicos (Erust et al., 2016).

El tratamiento de los catalizadores agotados, mediante lixiviación ácida, permite extraer el vanadio contenido en ellos, el cual puede ser recuperado posteriormente para su uso directo en la obtención de una aleación especial o en la confección de la carga aleante de un consumible de soldadura. De aquí que el objetivo del trabajo consiste en estudiar la recuperación del vanadio contenido en los catalizadores agotados procedentes de la Fábrica Patricio Lumumba mediante procesamiento químico.

## **2. Metodología**

### **2.1 Materia prima y reactivos**

El residual catalítico agotado procede de la Fábrica Sulfometales Patricio Lumumba, perteneciente al Grupo Empresarial "Geominsal", Santa Lucía, provincia de Pinar del Río. Los resultados de la caracterización química del residual catalítico así como la composición recalculada a partir de los posibles compuestos químicos que deben constituir el residual catalítico se muestran en la Tabla 1.

La muestra de catalizador agotado fue triturada, en un molino de disco, hasta un diámetro de partícula  $< 0,25$  mm y posteriormente secada en una estufa a  $120$  °C durante tres horas, para eliminar la humedad contenida en ella; finalmente es enfriada hasta temperatura ambiente, en una desecadora.



III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO

Tabla 1. Composición química de los catalizadores agotados procedentes de la Planta de Sulfometales

Contenido (%-m)								
Si	S	Fe	V	Na	Mg	Ca	Pb	
30,03	7,17	6,35	1,92	1,09	0,78	0,62	0,16	
Contenido (mg/kg)								
P	Mn	Ni	Zn	Cr	Cu	As	Sr	
809,20	323,37	269,13	183,25	181,40	139,73	64,57	62,09	
Composición química recalculada (en %-m)								
SiO <sub>2</sub>	S	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	PbO	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
64,35	7,17	9,07	3,43	1,47	1,30	0,87	0,17	0,41
MnO	NiO	ZnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	As <sub>2</sub> S <sub>5</sub>	SrO	otros	Total
0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	11,60	100,00

Fuente: elaboración propia

Como reactivo lixivante se utilizó ácido sulfúrico de calidad técnica al 29,95 %, a partir del cual fueron preparadas disoluciones a diferentes concentraciones: 2,9 %; 5,7 %; 5,8 %; y 11,4 % (v/v).

Las disoluciones diluidas de ácido sulfúrico fueron valoradas con disolución de NaOH de concentración 0,426 mol/L. El NaOH fue valorado con una disolución de HCl de concentración 0,1 mol/L preparada a partir de un fixanal.

Se utilizó keroseno para determinar la densidad picnométrica del catalizador agotado.

Se preparó una disolución patrón de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 2 000 mg/L de V, a partir de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de calidad PPA, para confeccionar la curva de calibración utilizada en la cuantificación del contenido de vanadio mediante espectroscopia ultravioleta visible. Para desarrollar el complejo coloreado se preparó, a partir de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrado, una disolución al 5 %.

## 2.2 Planificación experimental

El procesamiento del catalizador se ejecutó mediante un diseño de experimentos factorial completo (2<sup>3</sup>), es decir, tres factores a dos niveles, donde se evaluó la influencia sobre la lixiviación, de las variables independientes: X<sub>1</sub>: temperatura (°C), X<sub>2</sub>: relación sólido/líquido (S/L) y X<sub>3</sub>: concentración de ácido sulfúrico (%). Se seleccionaron como variables dependientes del diseño experimental: Concentración de vanadio en la fase líquida (Conc. V) y Rendimiento de lixiviación (Rdto. lix.). El procesamiento estadístico de los resultados obtenidos se realizó utilizando el Software STATGRAPHICS Centurion XV.



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

La matriz del diseño de experimento y los parámetros fundamentales para garantizar los niveles de variación en las variables independientes del diseño experimental se muestran en la Tabla 2.

Se mantienen como parámetros constantes: el tiempo de lixiviación (1 h); el tamaño de partícula (< 2,5 mm); y el número de Reynolds para garantizar un régimen de agitación turbulento ( $Re = 10\ 000$ ) durante el procesamiento.

Tabla 2. Matriz del diseño de experimentos

Punto	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	+	+	+	50	1/5 (20 %)	Doble del valor estequiométrico (11,4 %)
2	+	+	-	50	1/5 (20 %)	Valor estequiométrico (5,7 %)
3	+	-	+	50	1/10 (10 %)	Doble del valor estequiométrico (5,8 %)
4	+	-	-	50	1/10 (10 %)	Valor estequiométrico (2,9 %)
5	-	+	+	25	1/5 (20 %)	Doble del valor estequiométrico (11,4 %)
6	-	+	-	25	1/5 (20 %)	Valor estequiométrico (5,7 %)
7	-	-	+	25	1/10 (10 %)	Doble del valor estequiométrico (5,8 %)
8	-	-	-	25	1/10 (10 %)	Valor estequiométrico (2,9 %)

Fuente: elaboración propia

La muestra de catalizador agotado se mezcló con 100 mL de disolución de ácido sulfúrico diluido de concentración acorde a cada punto experimental. Las temperaturas de trabajo fueron 25 y 50 °C . Para mantener los 50 °C dentro del beaker se utilizó un baño de María regulado a 55 °C . La agitación se realizó con un agitador mecánico, cuya velocidad se controló con un tacómetro.

Transcurrido el tiempo de lixiviación, la fase líquida es separada del sólido residual mediante centrifugación a 314,16 rad/s (3 000 rpm).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Requerimientos para la lixiviación

De manera general, los procesos de extracción con disoluciones líquidas de elementos contenidos dentro de sólidos (lixiviación), se ven influenciados por diferentes factores: concentración, temperatura, tiempo de contacto, tamaño de partícula, relación sólido/líquido, agitación, entre otros (Richardson et al., 2002). La agitación favorece los procesos de extracción permitiendo mayor interacción entre el sólido y el líquido, facilitando la disolución de los compuestos solubles presentes (Granger Brown, 1988).

La adecuada selección de las condiciones de agitación, para una mezcla de catalizador agotado con disolución de ácido sulfúrico, debe facilitar el paso del vanadio a la fase



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

líquida contribuyendo a lograr una mayor recuperación del metal, disminuyendo por tanto su presencia en la fase sólida.

Cuando aumenta la relación S/L, se hace necesario incrementar la velocidad de agitación, para garantizar la turbulencia, lo que permitiría el mantenimiento de la movilidad constante del sólido y la adecuada interacción entre ambas fases, por lo que la transferencia de materia tendrá lugar en todos los puntos (Granger Brown, 1988).

En el diseño experimental planteado se trabaja con las variables relación S/L y concentración de ácido, lo cual implica variaciones en la densidad y viscosidad en la mezcla, por lo que se estableció un régimen turbulento ( $Re = 10\ 000$ ) para todos los experimentos. De acuerdo con la expresión del número de Reynolds, para lograr esta condición es necesario variar la velocidad de rotación para cada punto experimental,

valor que se obtiene de la Ecuación (2): 
$$Re = \frac{N \cdot d^2 \rho}{\mu} \quad (2)$$

Donde: N = velocidad de rotación [rps]

d = diámetro del agitador [m]

$\rho$  = densidad del fluido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$\mu$  = viscosidad [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ] (Chambergo et al., 2017).

La densidad de la mezcla para cada punto experimental se determinó a partir de la

Ecuación 3 (Pávlov et al., 1981): 
$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{\bar{x}}{\rho_{sol}} + \frac{1-\bar{x}}{\rho_L} \quad (3)$$

Donde:  $\rho_s$  = la densidad de la mezcla

$\bar{x}$  = es la parte de masa de la fase sólida en la mezcla

$\rho_{sol}$  = densidad del catalizador agotado

$\rho_L$  = densidad de las disoluciones de ácido sulfúrico

El cálculo anterior se realizó para las temperaturas de trabajo: 25 °C y 50 °C, y se utilizaron los valores de densidad reportados para el ácido sulfúrico a diferentes concentraciones (Poling, 2007).

El valor de la densidad del sólido (catalizador agotado) se determinó utilizando el método picnométrico (Quintana, 2013). El líquido utilizado fue keroseno ( $\rho = 0,8033 \text{ g/cm}^3$ ), ya que el catalizador no es soluble en él. La Ecuación 4 muestra la expresión de cálculo utilizada y el valor de densidad obtenido para el catalizador.

$$\rho_{catalizador} = \frac{[(P_{p+s}) - P_p] \rho_k}{[(P_{p+k}) - P_p] - [(P_{p+s+k}) - P_{p+s}]} = 2,043 \text{ g/mL} \quad (4)$$



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

Donde:  $P_p$  = peso del picnómetro

$P_{p+s}$  = peso del picnómetro con el catalizador

$P_{p+k}$  = peso del picnómetro con el keroseno

$P_{p+s+k}$  = peso del picnómetro con el catalizador y el keroseno

$\rho_k$  = densidad del keroseno

El coeficiente dinámico de viscosidad para las mezclas catalizador/ácido sulfúrico se calcula a partir de la Ecuación 5 (Pávlov et al., 1981) mostrada a continuación:

$$\mu_s = \mu_l(1 + 2,5\varphi) \quad (5)$$

Donde:  $\mu_l$  = coeficiente dinámico de viscosidad de las disoluciones de ácido sulfúrico

$\varphi$  = la parte en volumen de la fase sólida en la mezcla

La determinación del coeficiente dinámico de viscosidad del ácido sulfúrico ( $\mu$ ), a las temperaturas de trabajo, se realizó a partir de la dependencia de la viscosidad ( $\mu < 10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con la temperatura, la que se expresa en la Ecuación 6 (Quintana, 2013):

$$\mu = ke^{\frac{E_\mu}{RT}} \quad (6)$$

Donde:  $k$  = una constante

$E_\mu$  = energía de activación del fluido viscoso

De la ecuación antes planteada, al aplicar el logaritmo a ambos miembros, se obtiene una dependencia lineal entre la viscosidad y la temperatura, cuya relación se muestra en la Ecuación 7:

$$\ln \mu = A + B/T \quad (7)$$

Vinal and Craig (2016) reportan valores de viscosidad obtenidos experimentalmente para diferentes temperaturas, a partir de los cuales se obtiene la ecuación del modelo y se determina la viscosidad a la temperatura deseada. Este procedimiento se realiza para cada una de las disoluciones de ácido sulfúrico utilizada, obteniéndose las curvas mostradas en la Figura 1.

Una vez obtenidos los valores de densidad y viscosidad, se determina la velocidad de agitación requerida para garantizar un régimen turbulento ( $Re = 10\ 000$ ) a partir de la Ecuación 2, obteniéndose los resultados en rps, los que son convertidos a rad/s, de acuerdo a las conversiones:  $1 \text{ rpm} \approx 0,01667 \text{ rps}$  y  $1 \text{ rpm} \approx 0,1047198 \text{ rad/s}$  (Maloney, 2007). Los resultados se muestran en la Tabla 3.



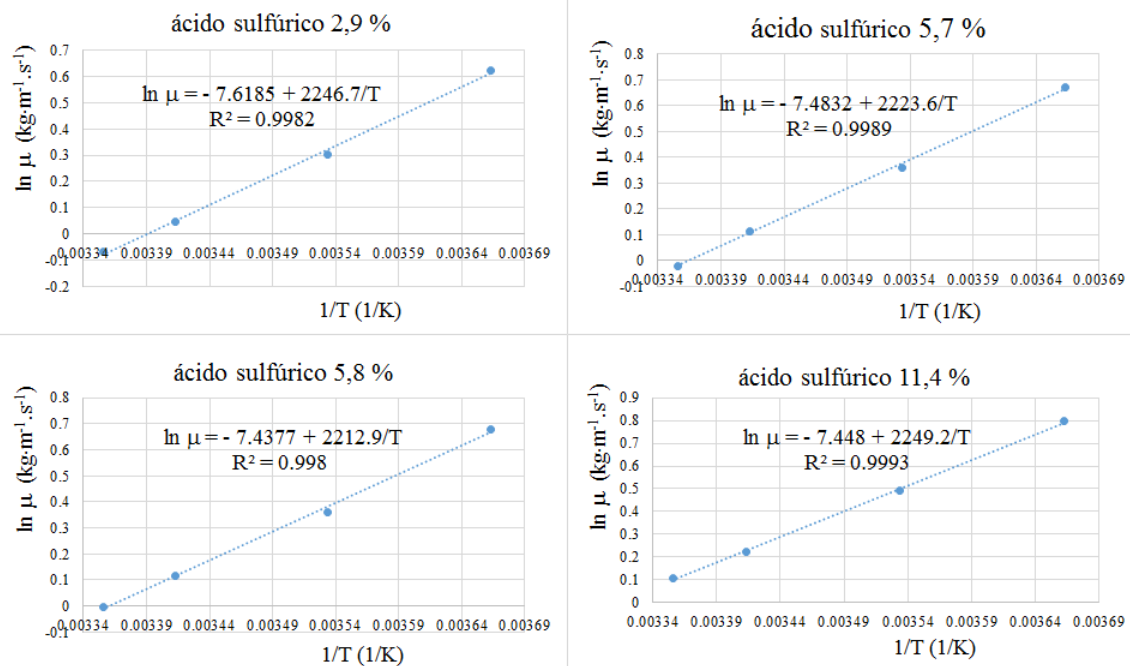


Figura 1. Dependencia entre viscosidad y temperatura para disoluciones de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Fuente: elaboración propia).

Tabla 3. Velocidad de agitación requerida por cada punto del diseño (en rad/s)

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8
Velocidad	42,94	39,58	39,06	36,86	76,86	69,64	69,32	66,08

Fuente: elaboración propia

El sistema de agitación quedó formado por un beaker de 250 mL y un agitador de paleta plana, con su eje desplazado del centro del recipiente, como se muestra en la Figura 2 a), en la que se pueden observar las dimensiones de la paleta y del recipiente. La relación entre la longitud del impulsor (D<sub>p</sub>) y el diámetro del beaker (D<sub>r</sub>) es 0,441, la que se encuentra dentro del intervalo establecido (0,33 < D<sub>p</sub>/D<sub>r</sub> < 0,50) (Genck, 2007).

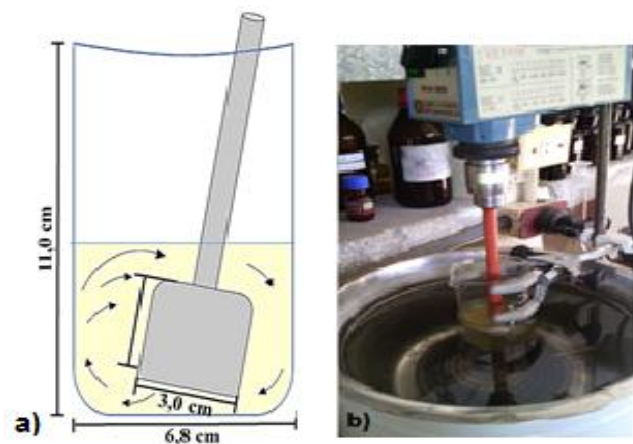


Figura 2. a) Esquema del sistema de agitación. b) Proceso de lixiviación ácida (Fuente: elaboración propia).



### 3.2 Procesamiento químico del residual

El procedimiento de trabajo consistió en mezclar la muestra de catalizador agotado con una disolución de ácido sulfúrico diluido (agente lixivante) con el objetivo de separar los elementos solubles (lixiviables) del resto de los compuestos que conforman el residual, los que permanecen como residuos insolubles. La lixiviación con ácido sulfúrico fue realizada de acuerdo a las condiciones planteadas en el diseño de experimentos (Tabla 2) y velocidades de agitación determinadas para cada punto (Tabla 3). En la Figura 2 b) se muestra la imagen de un experimento realizado, donde se utiliza un agitador mecánico y un baño de María para garantizar la temperatura requerida.

Una vez transcurrido el tiempo de lixiviación, se separa la fase líquida del residuo sólido mediante centrifugación, operación más rápida que la filtración, la cual implicaría mayor tiempo de contacto entre el líquido y el sólido residual.

La fase líquida obtenida presenta una coloración verdosa y en la misma pueden observarse diferencias en cuanto a su intensidad. Los puntos en que la relación S/L es máxima (+) resultaron más oscuros (1, 2, 5, 6), evidenciándose una mayor concentración de elementos lixiviados. En la Figura 3 se muestran los líquidos obtenidos, observándose las diferencias en la coloración.



Figura 3. Fase líquida procedente de la lixiviación (Fuente: elaboración propia).

#### a) Concentración de vanadio en la fase líquida (Conc. V)

La determinación de la concentración de vanadio se realizó mediante espectroscopia ultravioleta visible, a partir de la formación de un complejo de color rojo cereza entre el vanadio y el  $H_2O_2$  (Harvey, 2000). De cada experimento se tomó una alícuota de 2 mL de la fase líquida, y a partir de una curva de calibración se determina la concentración de vanadio para cada experimento, cuyos resultados se reportan en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de vanadio para cada punto del diseño (mg/L)

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8
Conc. V	3729,1	3458,7	1871,9	1703,6	3356,6	3193,4	1611,7	1448,5

Fuente: elaboración propia



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

En la Tabla 4 se puede observar que el contenido de vanadio osciló entre 1 448 y 3 730 mg/L, correspondiéndole la mayor concentración al experimento 1, en el cual todos los parámetros del diseño son máximos, le sigue el punto 2, donde la concentración del ácido corresponde al valor estequiométrico (-), pero las demás variables son máximas (+), seguidos de los puntos 5 y 6. Estos cuatro experimentos tienen en común que la relación S/L es máxima (relación 1/5, 20 % de catalizador agotado), obteniéndose concentraciones entre 3 190 mg/L y 3 730 mg/L de V.

En el caso de los experimentos restantes (3, 4, 7 y 8), donde la relación S/L es mínima (relación 1/10, 10 % de catalizador agotado), el contenido de V en el lixiviado varió entre 1 448 mg/L y 1 872 mg/L. Estas marcadas diferencias entre los dos grupos se deben a que para el primer grupo la disponibilidad de componentes lixiviables es el doble.

Si se comparan los puntos para los cuales sólo varía la temperatura, se obtiene que los mayores contenidos de vanadio se alcanzan en aquellos experimentos donde la temperatura es máxima (50 °C), lo cual evidencia el efecto positivo de este factor.

En el caso de la variable concentración de ácido sulfúrico, en la Tabla 4 se aprecia que al aumentar la concentración del ácido (en el intervalo estudiado), para valores fijos de las otras dos variables, se produce un aumento del contenido de vanadio, debido a que hay mayor disponibilidad de ácido para reaccionar con el residual facilitando la difusión de los compuestos lixiviables hacia la fase líquida, pero tiene como desventaja que incrementa el consumo de reactivo lixivante.

El procesamiento estadístico de los resultados mostrados en la Tabla 4 fue realizado utilizando el Software STATGRAPHICS Centurion XV, el cual permitió obtener la ecuación de regresión del modelo. La Ecuación (8) muestra la ecuación obtenida para la variable concentración de vanadio, la que se caracteriza por un  $R^2_{(ajustada)} = 99,84 \%$ , para un nivel de confianza del 95,0 %.

$$\text{Conc. V} = 2546,69 + 144,14 * T + 887,76 * R(S/L) + 95,64 * CA \quad (8)$$

Donde: T: temperatura, R(S/L): relación sólido/líquido y CA: concentración del ácido.

El análisis estadístico dio como resultado que las tres variables independientes ejercen influencia significativa y positiva sobre la concentración de vanadio en la fase líquida procedente de la lixiviación, donde la mayor influencia la ejerce la relación S/L, lo cual está relacionado con la mayor disponibilidad del elemento metálico, facilitando su extracción.



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

La temperatura favorece la extracción del vanadio al disminuir la densidad y viscosidad de la mezcla, facilitando el paso del metal a la fase líquida. La concentración del ácido sulfúrico ejerce una menor influencia sobre la concentración de vanadio, aunque también positiva, aspecto que se justifica a partir del establecimiento de la relación estequiométrica como punto mínimo.

**b) Rendimiento de la lixiviación (Rdto. Lix.)**

A partir de la concentración de vanadio en la fase líquida se determinó el rendimiento de la lixiviación con relación al valor determinado mediante un balance de masa teórico del proceso (Perdomo Gómez et al., 2021). Los resultados del rendimiento de la lixiviación obtenidos para cada punto del diseño se muestran en la Tabla 5, en la que se puede observar que el mayor rendimiento de vanadio le corresponde al experimento 3, seguido del 1, correspondiéndole al 3 los valores máximos de concentración de ácido y de temperatura, así como la mínima relación S/L. En el experimento 3 se recupera el 97,3 % del vanadio teóricamente contenido en la fase líquida.

Tabla 5. Rendimiento de la lixiviación para cada punto del diseño (%)

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8
Rendimiento lixiviación	96,9	89,9	97,3	88,6	83,0	87,2	75,3	83,8

Fuente: elaboración propia

Para el punto 1, donde todos los factores son máximos, el rendimiento es del 96,9 %, observándose altos valores en ambos casos, aunque debe destacarse que el punto 1 tiene como ventaja que es capaz de procesar el doble de la masa de catalizador que el punto 3, para similares condiciones de operación, con lo cual se lograría un incremento considerable de la productividad.

A partir del procesamiento estadístico de los resultados mostrados en la Tabla 5 se obtuvo la ecuación de regresión del modelo (9), ajustado para la variable respuesta Rendimiento de la lixiviación, la que tiene un  $R^2_{(ajustada)} = 95,10 \%$ .

$$\text{Rdto. lix.} = 87,74 + 5,42 * T + 1,51 * R(S/L) + 0,381 * CA - 1,28 * T * R(S/L) + 3,56 * T * CA \quad (9)$$

A partir del análisis estadístico se obtuvo como resultado que resultaron significativas la temperatura y su interacción con la variable concentración del ácido sulfúrico, ambas positivas.



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

La mayor influencia la ejerció la temperatura, lo que puede estar relacionado con su efecto positivo sobre la velocidad de reacción, unido a la disminución de la viscosidad y densidad, aspecto que se ve fortalecido por la interacción de la temperatura con la concentración del ácido, obteniéndose los mayores rendimientos en los experimentos donde estas dos variables están en los niveles altos (experimentos 1 y 3).

El residuo sólido obtenido en cada punto del diseño fue secado en estufa a 120 °C, de manera general presentó coloración amarilla pálida. Estos residuales están constituidos fundamentalmente por SiO<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>, y S.

Las muestras de residual fueron procesadas para determinación el contenido de vanadio mediante espectroscopia ultravioleta visible, no desarrollándose la coloración rojo cereza característica de la formación del complejo con el peróxido de hidrógeno. Esto indica que la posible presencia de vanadio en estos residuales se encuentra por debajo del límite de detección de la técnica utilizada (0,15 mg/L de V), por tanto los residuales sólidos generados del procesamiento hidrometalúrgico de los catalizadores agotados de la fabricación de ácido sulfúrico cumplen con los indicadores medioambientales, no constituyendo un riesgo al medio ambiente de acuerdo al contenido de vanadio.

#### **4. Conclusiones**

- La determinación de la densidad y viscosidad de las disoluciones diluidas de ácido sulfúrico y de la mezcla ácido – catalizador, permitieron establecer el número de Reynolds como parámetro constante en el diseño, posibilitando que la lixiviación se realizara bajo condiciones de régimen de agitación turbulento ( $Re = 10\ 000$ ).
- El procesamiento químico de catalizadores agotados fue realizado mediante un diseño de experimento factorial completo ( $2^3$ ), variando temperatura, concentración del ácido sulfúrico y relación sólido/líquido; obteniéndose concentraciones de vanadio entre 1 448 y 3 730 mg/L donde los mayores contenidos le corresponden a los experimentos en que la relación sólido/líquido se encontraron en el nivel máximo.
- El procesamiento químico de catalizadores agotados, mediante lixiviación con ácido sulfúrico, permitió extraer hacia la fase líquida entre el 75 y 97 % del vanadio contenido en el residual, donde las variables independientes temperatura y concentración del ácido en los niveles máximos ejercieron la mayor influencia sobre el rendimiento.



## 5. Referencias bibliográficas

1. Agencia Cubana de Noticias (ACN), (2015) Juraguá: Sede del Confinatorio Nacional de Desechos. 11/12/2015. Consultado: 29 enero 2020. Disponible en: <http://www.acn.cu/medio-ambiente/14909-juragua-sede-del-confinatorio-nacional-de-desecho>.
2. Alonso, F.; Ramírez, S., Ancheyta, J. & Mavil, M., (2008) "Alternativas para la recuperación de metales a partir de catalizadores gastados del hidrotreatmento de hidrocarburos pesados: Un caso de estudio". *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 24(2), pp. 55-69.
3. Baran, E. J., (2017) "Vanadio: Un nuevo elemento estratégico". *Anales Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat.*, Tomo 69, pp. 84-114.
4. Chambergó, J. C.; ValverdE, Q.; Pachas, A. A. & Yépez, H., (2017) "Estudio del Comportamiento Fluido-Dinámico de un Agitador a Escala Reducida Mediante Simulación Numérica". *Información Tecnológica.*, 28(3), pp. 37-46.
5. Confinatorio Nacional, (2018) *Confinatorio Nacional de Desechos Peligrosos. Informe Técnico*. Empresa Química de Cienfuegos. 4 pp. Cuba.
6. Convenio de Basilea, (1989) Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su eliminación. PNUMA. 126 pp. <http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-s.pdf>
7. Erust, C.; Akcil, A.; Bedelova, Z.; Anarbekov, K.; Baikonurova, A. & Tuncuk, A., (2016) "Recovery of vanadium from spent catalysts of sulfuric acid plant by using inorganic and organic acids: Laboratory and semi-pilot tests". *Waste Management.*, 49, pp. 455-461.
8. Genck, W. J., et al., (2007) *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. Section 18, Liquid-Solid Operations and Equipment. 8th Edition, McGraw-Hill, 151 pp.
9. González, L. A., (2012) *Disposición final del catalizador pentóxido de vanadio por fijación en una escoria metalúrgica*. M.Sc. Julio Bonelli Arenas (Tutor). Tesis de Maestro en Ciencias. Universidad Nacional de Ingeniería, 126 pp.
10. Granger Brown, G. et al., (1988) *Operaciones básicas de la ingeniería química*. Tomo II, Edición Revolucionaria, Segunda Reimpresión, Cuba, pp. 528-529.
11. Harvey, D., (2000) *Modern Analytical Chemistry*. McGraw-Hill, Boston, 798 pp.



**III Convención Científica Internacional "Ciencia, Tecnología y Sociedad". Convención 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
CATALIZADORES AGOTADOS DE LA FÁBRICA PATRICIO LUMUMBA. FUENTE POTENCIAL DE  
VANADIO MEDIANTE PROCESAMIENTO QUÍMICO**

12. Ley No. 81, (1997) Ley No. 81 del Medio Ambiente. Gaceta Oficial de la República de Cuba Edición Extraordinaria.
13. Maloney, J. O., (2007) *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. Section 1, Conversion Factors and Mathematical Symbols. 8th Edition, McGraw-Hill, pp. 8.
14. Marinov, M. & Paunova, R., (2003) "Direct alumothermic obtaining of vanadium alloys out of worked-off vanadium catalysts". University of chemical technology and metallurgy, Bulgaria, pp. 283-288.
15. Pávlov, K. F., Romankov, P. G. & Noskov, A. A., (1981) *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en Tecnología Química*. Editorial Mir, Moscú.
16. Perdomo, L. A., Perdomo, L., Quintana, R., Rabassa, D., Mollineda, A., Palacio, A., Viera, O., (2021) "Recuperación mediante lixiviación ácida del vanadio contenido en catalizadores agotados". *Minería y Geología*, 37(1), pp. 74-89.
17. Petranikova, M., et al., (2020) "Vanadium sustainability in the context of innovative recycling and sourcing development". *Waste Management* 113. pp. 521–544. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.007>
18. Poling, B. E., et al., (2007) *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. Section 2, Physical and Chemical Data. 8th Edition, McGraw-Hill, pp. 113.
19. Quintana, R., (2013) *Conceptualizaciones científico-técnicas sobre el diseño, obtención y desarrollo de fundentes para soldadura automática por arco eléctrico a partir de minerales y residuales sólidos industriales*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
20. Richardson, J. F., Harker, J. H. & Backhurst, J. R., (2002) *Coulson and Richardson's Chemical Engineering. Particle Technology and Separation Processes*. Vol. 2, Fifth Edition, Oxford, Butterworth-Heinemann, pp. 502-503.
21. Vinal, G. W. & Craig, D. N., (2016) The viscosity of sulphuric-acid solutions used for battery electrolytes. Vol. 10, *Forgotten Books*. Copyright 2016 FB &c Ltd., pp. 780-793.