

ESTRATEGIA PARA LA GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PRODUCCIONES MÁS LIMPIAS EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES DE PRODUCCIONES GALVÁNICAS

Pablo Á. Galindo Llanes*, Milagros Ugarte Marchena*, Hilda Oquendo Ferrer*, Erenio González Suárez**, Amaury Pérez Martínez**

* Universidad de Camagüey, **Universidad Central de las Villas

A partir del análisis de la situación ambiental y de la aplicación de acciones proactivas en la industria, se define la importancia de integrar herramientas de gestión empresarial al análisis de procesos, como vía para el cambio del accionar histórico en la solución de los problemas; lográndose a través de la concepción de una metodología que considera como un sistema integrado los elementos de gestión de calidad, ambiental al análisis de procesos, para elevar el desempeño técnico, económico y ambiental de las industrias.

La metodología fue aplicada a un sistema de tratamiento de residuales contaminados con metales pesados provenientes de una planta de producciones galvánicas. Para la caracterización y evaluación del proceso se realizaron balances de masa con reacción química en el reactor reductor. Los problemas que afectan el desempeño de la industria están referidos al desarrollo de la tecnología y su solución está basada fundamentalmente en la aplicación de buenas prácticas de operación en el proceso.

Palabras clave: gestión ambiental, gestión de la calidad, análisis de procesos, tecnologías limpias, producciones galvánicas.

Trough the analysis of environmental situation and the improvements of solution with proactive character was defined the importance of integration of enterprises management tools, as the way to change the historical forms to resolve the environmental problems; obtaining this change, trough the methodology considering quality management systems, environmental management systems and process analysis techniques as a whole to propitiante favorable scenery to increase the application level of solution of proactive character and range of positive global impacts in Cuban industrial field. The methodology was applied in the wastewater treatment systems for liquid residuals with heavy metals resulting of galvanic process. The characterization and evaluation of the process development was determined by the realization of mass balances in the chemical reactor. The main problems identified are conducing to development of technological process and its solution are basing in the application of the best practical operation.

Key words: environmental management, quality management, mrocess analytics, clean, galvanic productions.

Introducción

La necesidad de una industria sostenible, necesariamente deberá estar encaminada a la aplicación, de forma integrada, de herramientas de gestión empresarial, dentro de ellas la gestión de calidad en las organizaciones y de gestión ambiental.

En la actualidad, por medio de disímiles técnicas, se ha llegado a comprobar que varios de los daños causados durante el desarrollo de la humanidad son prácticamente irreversibles. Dentro de las industrias de importancia ambiental, producto a las características nocivas de los residuales que genera, se puede mencionar la de producciones galvánicas para el tratamiento de superficies

metálicas. Se ha comprobado que pequeños volúmenes de residuales contaminados con metales pesados, entre ellos el cromo hexavalente, son capaces de contaminar elevados volúmenes de agua de los cuerpos receptores.

Numerosas técnicas para el tratamiento de estos residuales han sido estudiadas y aplicadas, un lugar importante en estas lo ocupa el sistema tradicional consistente en la aplicación de sistemas de reducción del cromo hexavalente a su especie trivalente, la posterior neutralización para alcanzar el rango de pH requerido para facilitar la precipitación de las especies insolubles (6,5 – 7,5) y ser eliminadas posteriormente a través de los procesos de sedimentación. /1-3/.

Atendiendo a la visión actual sobre el tratamiento a los problemas ambientales hacia un enfoque proactivo de los mismos, se sugiere la aplicación del enfoque P+L en este sector.

Fundamentación teórica

La aplicación de herramientas de análisis de procesos permite al ingeniero ver un gran escenario primero y los detalles después, permite identificar los objetivos globales de eficiencia antes de cualquier actividad de desarrollo y encontrar la estrategia óptima para llevarla a cabo. Contar con una data de valores estadísticamente consistente, que describa de forma acertada el comportamiento del proceso y los fenómenos que lo conforman, así como el conocimiento de los valores óptimos para el funcionamiento de sus operaciones, garantizaría un proceso industrial óptimo. Si a su vez se integran herramientas de gestión y control de calidad, capaces de manejar estratégicamente los datos disponibles para prevenir deficiencias durante el desarrollo del proceso y tomar soluciones acertadas permitirá bajo la filosofía de las herramientas de gestión ambiental alcanzar el desarrollo de una industria verdaderamente sostenible.

En los últimos años, producto de las exigencias ambientales, se ha comenzado a establecer normas de vertimiento para los residuales con altas exigencias en cuanto a la calidad con que son dispuestos al medio, lo que provoca que los costos de tratamiento se eleven y que se comience a trabajar en la búsqueda de nuevos métodos con enfoque preventivo para el control de la contaminación industrial, dentro de ello puede mencionarse las herramientas de gestión ambiental Ecoeficiencia, Evaluación de impacto ambiental, análisis de ciclo de vida y producciones más limpias. Dentro de las herramientas de gestión ambiental más factibles de aplicación se encuentra la producción más limpia (P+L), su principio organizativo es la eficiencia y su definición más habitual presente en programas a nivel mundial es la establecida por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente que plantea "la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada en los procesos, productos y

servicios que aumente la ecoeficiencia y reduzca los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente". /4-6/

La Producción más limpia plantea como posibles opciones a identificar aquellas que traen consigo una reducción en la fuente generadora como son las modificaciones al proceso a través del desarrollo de buenas prácticas de operación, posible sustitución de materias primas, así como la aplicación de modificaciones tecnológicas y las que conllevan a modificaciones al producto. Otra posibilidad es la aplicación de técnicas de reuso interno y externo.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de la investigación se diseñó una metodología que integró a las técnicas de análisis de procesos las herramientas de gestión de calidad y de gestión ambiental basada en lo planteado por /7-11/, y que está compuesta por las siguientes etapas:

Etapas I:

Definición aplicación y revisión de la política ambiental empresarial. Contiene la misión y visión de la empresa para el mejoramiento continuo ambiental a través de la aplicación de herramientas de gestión empresarial de forma integrada en concordancia con la legislación existente.

Etapas II:

Caracterización del desempeño técnico – económico y ambiental de la industria. En esta etapa se desarrolla el proceso de caracterización ambiental de la industria atendiendo a dos aspectos el social y el técnico – económico. Incluye la conformación del equipo auditor encargado de desarrollar todo el proceso de caracterización, evaluación y de generación de alternativas.

Etapas III:

Evaluación del desempeño técnico – económico y ambiental de la industria. En esta etapa se desarrolla la evaluación del desempeño técnico económico y ambiental de la industria, a través de la definición y determinación de los indicadores necesarios y más relevantes en el

orden de responsabilidad social de la empresa y en el técnico-económico.

Etapas IV:

Generación de alternativas para implementación de opciones que conlleven al mejoramiento del desempeño técnico – económico y ambiental a través de opciones de producción más limpias. Constituye todo el proceso de identificación, análisis y evaluación de posibles alternativas con un enfoque proactivo en el tratamiento de los problemas ambientales.

Etapas V:

Ejecución de alternativas. Constituye todo el proceso de inversión y puesta en marcha de las alternativas viables a corto, mediano y largo plazos en dependencia del orden de prioridad definido. Por parte de la dirección técnica de la industria deberá llevarse a cabo un proceso de medición de los beneficios obtenidos resultado de la explotación de las alternativas aplicadas.

Etapas VI:

Monitoreo y control. Esta etapa establece un carácter sistémico a partir de la evaluación y mejora continua del proceso, a través del seguimiento de los indicadores técnico–económicos y ambientales.

Análisis de los resultados

Los resultados en la primera etapa de la metodología mostraron al analizar la política ambiental establecida que los objetivos son bastante abarcadores, pero sin un plan de acción detallado, la misma no establece metas a cumplir por la industria, como tampoco incluye los indicadores ambientales que de forma concreta evidencian el cumplimiento de las normas que están establecidas. La política carece de acciones enfocadas a las producciones más limpias.

En la etapa de caracterización fue analizado el flujo tecnológico del proceso productivo identificándose la necesidad de evaluar el funcionamiento del sistema de tratamiento de residuales instalado, debido a la importancia de lograr la total reducción del cromo hexavalente proveniente del proceso a su especie trivalente, garantizando así la disminución de los efectos nocivos de este metal pesado. Para el análisis del sistema de

tratamiento se analizaron los resultados de las caracterizaciones de residuales realizadas a lo largo del proceso de tratamiento de residuales.

Para cada una de las muestras se determinaron las concentraciones de Ni, Pb, Zn, Cu, Fe, Cr y pH. Las muestras tomadas en un período de 18 días fueron analizadas estadísticamente empleando el software profesional STATGRAPHICS versión 5.0 y se compararon los resultados con los valores normados para este tipo de industria./12/

El estudio aportó los siguientes elementos:

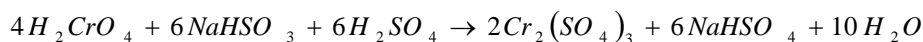
Los resultados son lógicos de acuerdo a la consecutividad en el grado de eliminación de los contaminantes a lo largo del sistema de depuración. Existen momentos en que el sistema no cumple con las normas de vertimiento establecidas. Los valores más significativos están en correspondencia con las concentraciones de cromo y hierro. Los resultados demuestran que se incumple con la norma si se analiza puntualmente el valor máximo reportado en el estadístico descriptivo para el caso del hierro, esto puede estar basado en la alta variabilidad de los resultados y con riesgo de incumplirse para el caso del cromo. Las concentraciones de los otros metales analizados (Cu, Ni, pH, Zn) se encuentran en norma.

El procesamiento estadístico de la data de valores correspondiente a las concentraciones diarias de cromo hexavalente en el residual tratado, en el período del 2003-2005, dió como resultado que los mismos presentan una alta variabilidad no ajustándose la data de valores a una distribución probabilística Normal lo que dificulta el desarrollo eficiente del proceso de reducción. Los resultados obtenidos son lógicos atendiendo a que en el proceso productivo se generan residuales de alta y baja concentración de cromo VI de acuerdo al desarrollo del proceso. Los residuales de alta concentración provienen de las descargas de las cubas donde se desarrolla el proceso de deslaqueado de las piezas metálicas (proceso de mayor aporte de este contaminante al residual producto al empleo del anhídrido crómico). Los residuales de baja concentración son aquellos que provienen de los enjuagues sucesivos durante el proceso, estos tienen un mayor volumen. Este aspecto dificulta la dosificación de las cantidades

de reactivos que hay que suministrarle al reactor para que se logre un 100 % de conversión en la reacción de oxidación–reducción.

El análisis del diagrama causa–efecto determinó que los principales problemas que pueden estar asociados a la baja eficiencia técnico – económica y ambiental del sistema de tratamiento están dirigidas a la presencia de indisciplinas tecnológicas en el campo de la tecnología, la mano de obra y el control en la ejecución del proceso.

El desarrollo inadecuado de la tecnología en el reactor reductor provocó la presencia de escapes de cromo hexavalente en el residual tratado y pérdidas económicas producto a excesos en el consumo de reactivos químicos, aspectos que conllevaron a que la cuantificación de los costos



Se consideró como sustancia limitante, partiendo del objetivo de la operación, el Cr^{6+} y se tomó como base de cálculo un día.

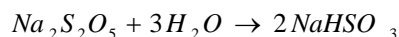
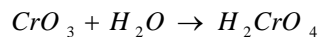
El desarrollo de los balances de masas con reacción química para el período de tiempo especificado, validó la existencia de escapes de cromo hexavalente al final del sistema de tratamiento, aportándose al medio receptor un total de 4 500,46 kg en disolución en el período analizado, aspecto de importancia ambiental debido al carácter acumulativo de los metales pesados.

Otro resultado importante de la realización de los balances de masa demostró que en el desarrollo de la operación el ácido sulfúrico se emplea sólo para disminuir el pH a tres unidades y no en las cantidades estequiométricas requeridas para el completamiento de la reacción, dejando de ser el cromo hexavalente la sustancia limitante en el proceso, para convertirse el ácido sulfúrico. Esto justifica los escapes del principal agente contaminante al medio receptor.

Así mismo, se detectó un consumo excesivo de reactivos químicos para el desarrollo de la reacción, si se tiene en cuenta que no se añaden las cantidades estequiométricas necesarias, que no se cumple eficientemente con el objetivo del tratamiento, y que se producen pérdidas económicas por el consumo excesivo de las materias

de oportunidad procesados para la jerarquización de las causas buscando su solución estratégica, a través del diagrama de Pareto, aportara como resultado un predominio de las causas asignables al aspecto tecnológico, de forma consecutiva a la causa control y en último lugar a la mano de obra.

Empleando la data de valores disponible se procedió a la realización de los balances de masa con reacción química empleando las siguientes ecuaciones:



La ecuación de reducción del cromo hexavalente con bisulfito de sodio en presencia de ácido sulfúrico es:

primas. Puede aseverarse que el desempeño técnico–económico y ambiental del sistema de tratamiento de residuales es deficiente.

Se muestreó el contenido de sólidos a la entrada y salida del sedimentador para determinar su eficiencia obteniéndose una media de un 70,8 %.

Si se tiene en cuenta la cantidad de cromo III que se forma en el reactor reductor se obtiene entonces que existe un potencial de cromo trivalente que se vierte al medio receptor. Se estimó que se vertieron al medio aproximadamente un total de 414 9,38 kg en disolución en el período estudiado por ineficiencias en la sedimentación, generándose un impacto negativo.

Escape de Cr III residual = MM $Cr_2(SO_4)_3^*$ n $Cr_2(SO_4)_3^*$ (1-E) = 414 9,38 kg

donde:

MM $Cr_2(SO_4)_3$ - Masa Molar del Sulfato de cromo III, (kg/kmol)

n $Cr_2(SO_4)_3$ - Cantidad de sustancia formada de Cromo hexavalente en el período (resultado de los balances de masa con reacción química) (mol).

E - Eficiencia media del sedimentador determinada experimentalmente.

Los indicadores técnico-económicos y ambientales se elaboraron a partir de las cantidades

de reactivos de metabisulfito de sodio y ácido sulfúrico empleadas en la etapa de reducción de cromo hexavalente atendiendo a las deficiencias técnicas y a las pérdidas económicas.

El uso de los mismos se justifica, por ser significativos en el costo de explotación del sistema de tratamiento. Ambos reactivos forman parte de las materias primas y esta del

costo de producción, además muestran el comportamiento y evolución del consumo de reactivos para tratar un volumen de residual determinado. Desde el punto de vista ambiental se justifica porque un descontrol en las cantidades añadidas significa un vertimiento adicional de agentes químicos al cuerpo receptor y de posibles escapes de cromo hexavalente. Los indicadores fueron los siguientes:

$$\frac{[kg \text{ (Metabisulfito de Sodio) }]}{\text{Metros Cúbicos Agua Residual}}$$

$$\frac{[kg \text{ (Hidróxido de Sodio) }]}{\text{Metros Cúbicos Agua Residual}}$$

$$\frac{[kg \text{ (Acido Sulfúrico) }]}{\text{Metros Cúbicos Agua Residual}}$$

$$\frac{[\$(Pérdidas)]}{\text{Metros Cúbicos Agua Residual}}$$

$$\frac{[\$(Costo por Consumo de Sustancias Químicas)]}{\text{Metros Cúbicos Agua Residual}}$$

En todos los casos se observó que existe una tendencia al descontrol y una alta variabilidad en el empleo de los agentes químicos utilizados en el proceso.

Si se tiene en cuenta que los sedimentadores se encuentran en mal estado técnico, que existe una matriz compleja de metales pesados en el afluente que por sus características no precipitan en el mismo rango de pH; que no se emplean agentes coagulantes y floculantes que permitan incrementar el tamaño de partícula para mejorar la eficiencia en el sedimentador, aspectos que justifican los escapes de cromo III al medio, puede asegurarse entonces que el desempeño técnico y ambiental de esta etapa del sistema es ineficiente.

De esta misma forma el desempeño técnico - económico y ambiental global del sistema de tratamiento es inadecuado.

Generación de alternativas para implementación de opciones que conlleven al mejoramiento del desempeño técnico-económico y ambiental a través de opciones de producción más limpia

Después de concluir que el desempeño de la fábrica no es adecuado y tener en cuenta las vías planteadas para la búsqueda de soluciones a partir de la aplicación de técnicas de producciones más limpia, se determinó que los problemas principales detectados pueden ser solucionados a través del empleo de Buenas Prácticas de Operación en el desarrollo del proceso.

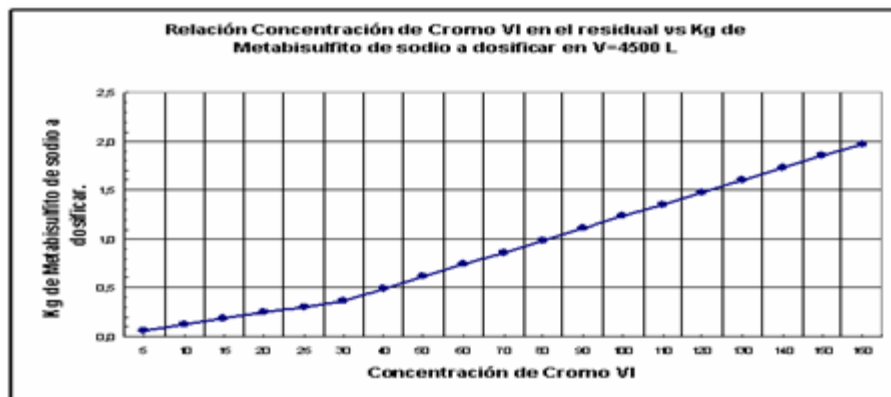


Gráfico para determinación de dosis de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ a añadir en el reactor reductor de cromo VI.

A partir de los balances de masa y determinando las cantidades a reaccionar en el proceso de reducción de cromo VI se determinaron curvas de dosificación de reactivos químicos al reactor reductor de cromo, esta herramienta agiliza el trabajo de los operarios y se añaden las cantidades estequiométricamente requeridas para el desa-

rollo de la reacción lo que conllevaría a una reducción importante de los reactivos consumidos en exceso, y se atenuaría el efecto de la variabilidad en las concentraciones de cromo, si se tiene en cuenta que dentro del proceso de control de calidad establecido al inicio del sistema se determinan las mismas.



Gráfico para determinación de dosis de H_2SO_4 al 10 % a añadir en el reactor reductor de cromo VI.

La disponibilidad de equipamiento permite establecer un sistema de sedimentación a diferentes valores de pH del residual tratado que permitirá la sedimentación forzada de los diferentes metales pesados presentes, logrando así eliminar interferencias en la precipitación de sus especies insolubles y alcanzar una mayor calidad

en el efluente de la planta al no focalizar el funcionamiento del sistema solamente al cromo, independientemente de ser el contaminante de mayor importancia ambiental. Esto se justifica a partir de los valores óptimos de pH reportados por /13/, que se representan en la siguiente tabla:

Metal Pesado	Fe	Cu	Zn	Cr	Ni
Valor óptimo de precipitación	4	8,1	10,1	7,5	10,8

desaConclusiones

1. La aplicación de la metodología diseñada para el análisis del proceso productivo demostró que existen deficiencias que afectan el desempeño técnico-económico y ambiental del proceso, incidiendo fundamentalmente deficiencias de carácter tecnológico.
2. Las deficiencias pueden solucionarse estratégicamente a partir de opciones de producción más limpia dirigidas a las buenas prácticas de operación.

Bibliografía

1. Sociedad Pública de Gestión Ambiental IS. Libro blanco para la reducción de residuos y emisiones. Recubrimientos electrolíticos. País Vasco: Departamento de ordenación de territorio vivienda y medioambiente.
2. GTZ SAdCT, Metropolitana CA. Manual de minimización, tratamiento y disposición. Concepto de manejo de residuos peligrosos e industriales para el giro de la galvanoplastia. México D.F; 1998. p. 124.
3. Soto E. La minimización de residuos en la pequeña industria galvánica [Tesis presentada en opción al Título de Doctor en Ciencias Técnicas]. Camagüey: Universidad de Camagüey; 2005.
4. ONUDI. El desarrollo que mejora la calidad de vida de los pueblos y las naciones sin comprometer la de las futuras generaciones. World Commission on Environment and Development. 1987.
5. EPA. Integrated Environmental Management Systems. Implementation Guide. Washington, DC: Office of Pollution Prevention and Toxics. U.S. Environmental Protection Agency.; 1992 b.
6. P+L. Producción Más Limpia. Ciudad de la Habana: Red Nacional de Producción Más Limpia CITMA; 2002 2002 (julio-septiembre) Contract No.: Document Number|.
7. Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con orientación para su uso. [ISO 14001:2004 (Traducción certificada), IDT], NC-ISO 14001:2004. (2004 h).
8. Sistemas de gestión ambiental - directrices generales sobre principios, sistemas y técnicas de apoyo. [ISO 14004:2004 (Traducción certificada), IDT], NC-ISO 14004:2004. (2004 i).
9. Cantú Delgado H. Desarrollo de una Cultura de Calidad. 2da ed. México,D.F.: McGraw-Hill/ Interamericana Editores.; 2001.
10. Ley del Medio Ambiente, No. 81. (1997a).
11. CIGEA. La P+L en las políticas y prácticas vigentes en Cuba. La Habana: CITMA - CIGEA 2003 d Contract No.: Document Number|.
12. Eliminación de contaminantes en talleres galvánicos. Parámetros de vertimiento, NC-24:1999. (1999 b).
13. Technologies WS. Precipitation by pH. Journal [serial on the Internet]. 2002 Date.