

APLICACIÓN DE REGLAS HEURÍSTICAS EN LA SÍNTESIS DE PROCESOS

APPLICATION OF HEURISTIC RULES IN THE PROCESS SYNTHESIS

SAMUEL KAZES GÓMEZ

Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, skazes@unalmed.edu.co

JAVIER FERNANDO DE LA CRUZ MORALES

Ingeniero Químico, M.Sc, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, jfdlcruz@unalmed.edu.co

Recibido para revisar junio 16 de 2008, aceptado octubre 28 de 2008, versión final noviembre 29 de 2008

RESUMEN: En este artículo es presentado un procedimiento para la síntesis de procesos, el cual comprende las siguientes etapas: La identificación o definición del problema primitivo; la creación de las alternativas de solución, a través del método de la Descomposición Jerárquica de Douglas; el análisis de las alternativas consideradas; y finalmente la elección de la solución más razonable. Con el propósito de ilustrar el anterior procedimiento se expone un ejemplo de aplicación hecho en una curtiembre, donde se muestran varias consideraciones según unas reglas heurísticas, y sus respectivos análisis, de acuerdo a restricciones técnicas, locativas y de seguridad, para la obtención de la mejor solución en la modificación del proceso de evacuación de los productos de acabado que no se logran retener sobre el cuero en una máquina pigmentadora de pistolas. La solución más adecuada fue la selección e instalación de una torre de aspersión, obteniéndose una eficiencia de retención de material particulado cercana al 40%; lográndose satisfactoriamente la disminución de la contaminación ambiental generada.

PALABRAS CLAVE: Síntesis de procesos, Descomposición Jerárquica de Douglas, Proceso modificado, Reglas heurísticas, Curtiembre.

ABSTRACT: In this article is presented a procedure for the process synthesis, which is compound by the following stages: The identification or the primitive problem definition; the creation of alternative solutions, through the Douglas Hierarchical Decomposition method; the analysis of the considered alternatives; and finally the choice of the most reasonable solution. With the purpose to illustrate the last procedure is exposed an example of application made in a tannery, where are shown several considerations depending on heuristic rules, and their respective analysis, according to techniques, locatives and safety restrictions, in order to obtain the best solution in the process modification of finish's products evacuation which cannot be kept on the leather in a paint spray gun machine. The most appropriate solution was the selection and the installation of a spray tower, obtaining an efficiency of particulate matter retention close to 40%; thus, the environmental pollution generated was successfully reduced.

KEYWORDS: Process synthesis, Douglas Hierarchical Decomposition, Modified process, Heuristic rules, Tannery.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de proceso es una instalación que efectúa la transformación de materias primas,

energía y experiencia (“Know-How”) en productos útiles, mediante reacciones químicas u operaciones unitarias, constituyendo la columna vertebral de la sociedad industrial

moderna [1]. El profesional encargado de crear dichos sistemas, en la mayoría de las ocasiones, es el ingeniero químico, a través de la síntesis de procesos; la cual consiste en la generación de alternativas de diseño y la selección de la mejor [2]. Como una actividad de diseño, la síntesis es una actividad compleja que envuelve un gran número de consideraciones, decisiones, alternativas y acciones; comprendiendo diferentes puntos de vista [3].

Tan pronto como se prevé la necesidad de resolver un problema primitivo, declaración de una necesidad definida vagamente, el ingeniero debe generar varios problemas específicos cuyas soluciones sean una respuesta satisfactoria al mismo, incluyendo o no ideas propias patentables; es decir, se debe tener la seguridad de que las alternativas de procesos específicos creadas puedan transformar el problema primitivo en una solución práctica [1].

La mayor cantidad de errores en los diseños existentes son causados por precisar el diagrama de flujo de manera muy anticipada y sin un análisis concienzudo de los resultados, en el desarrollo de un proceso. Debido a esto, es necesario usar herramientas para generar y evaluar cuidadosamente las alternativas de procesos, como la “Descomposición Jerárquica de Douglas”. Este método permite materializar el problema específico en una solución concreta, a través del seguimiento de un procedimiento descrito en términos de una jerarquía de decisiones [4], basadas generalmente en reglas heurísticas compuestas por la intuición, el conocimiento ingenieril y los principios físicos [5]; dando como resultado el diagrama de flujo del proceso que representa la solución más razonable al problema inicialmente planteado [4].

La síntesis de alternativas de procesos nuevos o modificados requiere de habilidades creativas e inventivas que se adquieren o, como mínimo, se desarrollan mediante la práctica. Por esta razón, es fundamental que el que se inicia en la ingeniería de procesos se ejercite y adquiera experiencia analizando una

gran variedad de problemas prácticos, tal como el que se incluye en este artículo a manera de ejemplo.

2. DISEÑO PRELIMINAR DE PROCESOS

El diseño ingenieril de sistemas de proceso es una actividad dialéctica entre objetivos y posibilidades, la cual busca la satisfacción de una función y las especificaciones de rendimiento.

De forma concisa el diseño de un proceso consiste en las tres etapas siguientes:

- Seleccionar un conjunto apropiado de operaciones unitarias y sus interconexiones.
- Seleccionar la clase de equipos adecuados para llevar a cabo las operaciones unitarias.
- Escoger las mejores dimensiones y condiciones de operación de los equipos.

Las dos primeras etapas mencionadas son esencialmente elecciones discretas donde las características principales de cada operación juegan un papel primordial. La colección de operaciones unitarias posibles para un determinado objetivo, al igual que el conjunto de conexiones viables entre ellas, son finitos. El diseñador debe definir “a priori” criterios de ponderación de manera tal que el proceso tenga, entre otras, las siguientes características:

- | | |
|-----------------|-----------------------------|
| -Seguridad | -Impacto ambiental positivo |
| -Flexibilidad | -Controlabilidad |
| -Predecibilidad | -Mantenimiento fácil |
| -Rentabilidad | -Fiabilidad |

La asignación de pesos a cada característica es función del objetivo principal, de la heurística y de la intuición ingenieril.

La tercera etapa incluye al conjunto como un todo, e implica el uso del modelamiento, del análisis de sistemas, de técnicas de optimización, y de la simulación de procesos [2].

Tipos de diseño

Son diversas las formas de clasificar el diseño de un equipo o de una planta industrial; entre ellas se encuentran:

- Según la capacidad: Escala de banco, escala piloto, escala de demostración, escala industrial.
- Según la forma de operación: Continuo, semicontinuo, por lotes.
- Según el objetivo: Productos y procesos conocidos, producto nuevo, proceso nuevo.
- Según el detalle: Orden de magnitud (30<error<50%), estudio (20<error<30%), preliminar (10<error<25%), definitivo (5<error<15%), detallado (2<error<5%).
- Cambios en las condiciones de operación de procesos continuos ó de secuenciación de procesos por lotes.
- Mejora en la recuperación de calor por rediseño de las redes térmicas.
- Modificaciones en el equipo existente (modificaciones internas y/o externas de los mismos).
- Compra de equipos nuevos para sustituir los menos eficientes.

Desde otra perspectiva, el diseño de un proceso se puede clasificar como:

- Procesos nuevos (PN).
- Procesos modificados (PM).
- Mantenimiento: Prevención de problemas y restablecimiento de condiciones normales de operación.
- Ampliaciones: Por aumento de capacidad de producción [2].

2.1 Diseño De Procesos Modificados (PM)

El diseño de “PM” es usado en general para realizar mejoras en la eficiencia, medida a través de los consumos de materiales y de energía.

Los procesos modificados se justifican para:

- Procesar materias primas nuevas.
- Suprimir “embotellamientos del sistema”.
- Producir compuestos nuevos y más valiosos.
- Mejorar la flexibilidad, seguridad, controlabilidad y operabilidad del proceso.
- Mejorar la calidad (pureza) del producto.
- Reducir costos de energía.
- Incrementar la eficiencia de transformación de materias primas.
- Implementar nuevas tecnologías.
- Facilitar el mantenimiento.
- Reducir el impacto ambiental.

Particularizando, puede decirse que entre los casos más comunes de diseño de “PM”, se tienen:

Entre las principales diferencias del diseño de “PM” respecto al diseño de “PN” se encuentran:

- Dificultad de ajustes en lo equipos existentes. Son mayores las restricciones y por lo tanto más difíciles las factibilidades técnicas y económicas.
- El tiempo es menos crucial (el único costo, en las primeras etapas del proyecto, es el consumo de tiempo de los expertos haciendo consideraciones sobre las modificaciones por hacer).
- El aspecto de múltiples opciones (problema combinatorio) no es importante; dados los pocos grados de libertad, respecto a un proceso nuevo, que hay en un proceso existente.

En cuanto a métodos sistemáticos en el diseño de “PM”, puede resumirse lo siguiente:

- Procesos totales: Se usan procedimientos que son una mezcla de heurística y algoritmos, generalmente basados en descomposiciones convencionales como la jerárquica de Douglas, los cuales incluyen un conjunto de modelos rápidos que dan cuenta de las restricciones de equipamiento.
- Para procesos con reacciones complejas: La experiencia con diseños de “PM” muestra que normalmente la disminución de costos por materias primas es mayor que la del ahorro de energía.
- Procedimientos por lotes: Estos procesos tienen un número importante de ventajas, como versatilidad para manufacturar un amplio rango de productos, flexibilidad para realizar diversas operaciones con un pequeño número de equipos y adaptabilidad para

cambiar la producción según las necesidades del mercado [2].

Restricciones en el diseño de procesos modificados (PM)

A grandes rasgos y en orden de importancia se tienen los siguientes condicionamientos:

- Restricciones de seguridad y de calidad ambiental.
- Restricciones estratégicas regionales: Desarrollo de tecnología autóctona para el uso de materia prima nacional.
- Restricciones técnicas: Problemas de robustez, flexibilidad y controlabilidad.
- Restricciones económicas: Costos de inversión y funcionamiento [2].

3. SÍNTESIS DE PROCESOS

La síntesis de procesos se puede definir como la “generación de alternativas de diseño y selección de las mejores; todo ello con base en información incompleta y/o inconsistente, y/o redundante” [6].

La primera etapa de diseño (diseño conceptual) de un proceso nuevo y/o la modificación sustancial de un proceso conocido (proceso modificado), implica la evaluación técnica y económica de aquellas alternativas que parezcan más viables (viabilidad juzgada con criterios generalmente heurísticos).

El problema central de la síntesis consiste en obtener, con la menor incertidumbre, las mejores alternativas entre una “inmensa” cantidad de posibilidades. Conocidas las opciones se procede a simular, técnica y económicamente, cada una de ellas para escoger la mejor según criterios previamente especificados [2].

3.1 La Síntesis De Alternativas Plausibles

Para la creación de alternativas de procesos nuevos o modificados se deben seguir las siguientes etapas:

-Definición del problema primitivo: Se establece cuál es la necesidad que precisa la atención del ingeniero.

-Creación de problemas específicos: Se proyectan diversos problemas específicos cuya solución puede satisfacer el problema primitivo.

-Análisis de los problemas específicos: Se ensayan los problemas específicos propuestos respecto a defectos manifiestos sobre su lógica, coste y seguridad.

-Selección de una solución: Se realiza la selección detallada del equipo y se determinan las condiciones de operación requeridas para obtener una solución óptima de los problemas específicos más prometedores [1].

3.1.1 Definición del problema primitivo

Los problemas asignados a un ingeniero de procesos rara vez toman la forma de un sistema de proceso específico listo para ser diseñado. Por el contrario, es frecuente que se presenten como una manifestación poco definida de una necesidad, a la que denominamos problema primitivo.

No existe un problema general de ingeniería de procesos al que pueda aplicarse una solución normalizada. Cada problema está rodeado por circunstancias peculiares que deben sopesarse y utilizarse, si bien con frecuencia pueden quedar ignoradas por un observador poco metodoso. Deben conocerse las razones exactas del origen del problema primitivo y las modificaciones permitidas para conseguir la definición de una solución satisfactoria.

Además debe disponerse de las propiedades químicas y físicas de todos los materiales que pueden intervenir en la solución del problema primitivo. Debe prestarse atención particular a las transformaciones químicas y físicas que experimentan aquellos, ya que constituyen la base de los procesos y pueden dar origen incluso a accidentes mediante la generación de materias tóxicas o explosivas. También es preciso familiarizarse con el equipo y los procesos convencionales disponibles en el mercado para llevar a cabo estas transformaciones [1].

3.1.2 *Los problemas específicos*

Con toda esta información, el ingeniero empieza a trazarse un plan de acción y se crea una variedad de problemas específicos cuyas soluciones podrían resolver plausiblemente el problema primitivo. El éxito de un proyecto de ingeniería depende críticamente de la calidad y variedad de los problemas específicos creados. Es evidente que después de un intenso esfuerzo de ingeniería podrá calibrarse exactamente la calidad de las alternativas [1]. Para la generación de éstas, existen diversos métodos de síntesis de procesos; dentro de los cuales, los más comunes son los siguientes:

- La “Descomposición Jerárquica de Douglas”: Subdivisión de un problema en varios sencillos que luego se ensamblan.
- La “Búsqueda Algorítmica”: Se busca el universo de mejores alternativas con ayuda de métodos de investigación de operaciones.
- La “Heurística”: Se obtienen configuraciones según experiencias exitosas del pasado. Son reglas plausibles pero no infalibles, y que evitan examinar todas las posibles secuencias (“Rules of Thumb”).
- La “Búsqueda Evolutiva”: Cada configuración es una mejora de la anterior [2].

Descomposición Jerárquica de Douglas

El método jerárquico heurístico es una extensión del método puramente heurístico, el cual combina reglas heurísticas con una estrategia evolutiva para el diseño de procesos [5]. Douglas, [4,7], ha propuesto un procedimiento jerárquico heurístico para la síntesis de procesos, descrito en términos de una jerarquía de decisiones, donde cada nivel de decisión permite complementar el diagrama de flujo del proceso que se va elaborando progresivamente. En muchos casos la heurística se usa como herramienta en la toma de decisiones, pero en otras situaciones ésta no está disponible o no aplica, tal que diversas alternativas son generadas [4]. De esta forma,

es posible descomponer un problema muy grande y complejo en un número de pequeños problemas más simples de manejar [7].

La aplicación de este método de síntesis no necesariamente conlleva al “mejor” de los diseños, pero sí permite desarrollar el más “razonable” [4].

Este método propone cinco niveles, en su orden:

- **Nivel 1. Discontinuo vs. Continuo.** Se opta por un proceso discontinuo cuando:
 - El proceso debe operar en pocos meses.
 - El producto a obtener sólo requiere de unos cuantos días de operación de la planta por año.
 - Hay poca información para el diseño y el proceso es bastante sensible a variaciones.
 - El producto es de vida corta.
 - El valor del producto es considerablemente mayor al costo de manufactura.
- **Nivel 2. Estructura de entradas y salidas.** Se consideran el número de corrientes, materias primas y productos, y su interrelación global. También se tienen en cuenta los subproductos e inertes (la forma en que intervienen y el modo de recuperación o de eliminación).
- **Nivel 3. Estructura de recirculados.** La recuperación y/o eliminación de componentes lleva a considerar la existencia de corrientes de “recirculación” y de “purga”.
- **Nivel 4. Especificación del sistema de Separación.** Generalmente las materias primas se recirculan al equipo en operación, los productos se recuperan y los subproductos se eliminan o recuperan en función de su cantidad e importancia. La selección de equipamiento implica la realización de evaluaciones económicas y de un buen conocimiento de la heurística del proceso.
 - **Subnivel 4A. Sistema de recuperación de vapor.**

- **Subnivel 4B. Sistema de recuperación de líquidos.**

- **Nivel 5. Red de intercambio calórico.** Se busca optimizar el número de intercambiadores de calor y de servicios (fuentes de “frío” y de “calor”) [2, 4, 7].

3.1.3 *Análisis y selección preliminar de las alternativas*

Evidentemente, la creación de alternativas de proceso conduciría a una gran variedad de posibles problemas de ingeniería de concepto y detalle. Sin embargo, es imposible realizar el diseño completo de cada alternativa para hacer luego una comparación detallada entre ellas. El diseño de un proceso exige en general un esfuerzo considerable, que no puede desperdiciarse en alternativas que son defectuosas y no pueden transformarse en sistemas comerciales.

Durante el análisis preliminar, el ingeniero se plantea las siguientes preguntas sobre cada alternativa:

1. ¿Es ilógico el concepto?
2. ¿Puede demostrarse que el concepto elaborado es inferior a otra de las alternativas sugeridas?
3. ¿Puede demostrarse que el concepto elaborado es equivalente o inferior a un esquema de procesos ya conocido que a su vez es inferior a otros?
4. ¿Puede demostrarse que el concepto requerirá una gran extrapolación técnica o económica de la tecnología existente, implicando por tanto un riesgo demasiado elevado?
5. ¿Es inseguro el concepto?
6. ¿El concepto sugiere otra alternativa mejor?
7. ¿El concepto implica competencia técnica especial que no se posee? [1]

3.1.4 *La solución*

El principal objetivo del ingeniero de procesos es conseguir la solución más satisfactoria y

económica al problema primitivo, a través de la selección de la mejor alternativa planteada, incluya o no ideas patentables. La solución óptima puede así utilizar o adaptar ideas de otros que se encuentren disponibles en forma de equipo comercial, diseños patentados y servicios de ingeniería de especialistas. El acto creativo se convierte entonces en la síntesis de un sistema nuevo y útil a partir de los elementos ya existentes [1].

4. **APLICACIÓN DE LA SÍNTESIS DE PROCESOS A UN CASO PARTICULAR**

Con la finalidad de ilustrar el procedimiento anteriormente planteado para llevar a cabo la síntesis de procesos, se presenta a continuación la aplicación de este en la modificación de un proceso existente, realizado con el objetivo de disminuir el impacto ambiental generado por el mismo. De acuerdo a las etapas definidas por Watson y Rudd, [1], el primer paso a realizar es la definición del problema primitivo:

Definición del problema primitivo

Dentro de los diferentes equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de transformación de la piel vacuna en cuero terminado, se encuentran las máquinas pigmentadoras de pistolas, las cuales hacen parte del área de terminación del cuero. Estas máquinas contribuyen notablemente a la generación de contaminación ambiental, al expulsar a la atmósfera aire contaminado con un porcentaje bastante elevado de dispersiones de acabado (arrastre de partículas sólidas) que no se logran fijar sobre el cuero.

El producto de acabado que es desperdiciado en el proceso de aplicación, queda retenido en forma de niebla dentro de la cabina de pulverización de la máquina; dicha niebla, consistente en finas gotas, es aspirada junto con el aire por un extractor hacia un ducto vertical de salida. Durante este trayecto, gran parte de estas gotas comienzan un proceso de solidificación, formando una gran concentración de material particulado dentro de la corriente de aire evacuado. Al final del ducto vertical, están ubicadas un total de cuatro rejillas con la

finalidad de retener este material; sin embargo, al traspasar las rejillas, la corriente gaseosa todavía cargada con una gran cantidad de sólidos es expulsada al ambiente a través de una chimenea; contribuyendo a la contaminación atmosférica generada por la curtiembre.

Gracias a esto, se hace necesaria la elección, diseño e implementación del sistema preliminar más adecuado para la retención de material particulado, en una curtiembre ubicada en Itaguí-Colombia; tal que se adecue a las condiciones in situ del proceso, con un mínimo de modificaciones sobre éste, y que alcance una buena eficiencia asociada con unos gastos de inversión y de operación mínimos. Contribuyendo así, a una producción más limpia en la curtiembre [8].

Creación de problemas específicos (alternativas de solución)

La siguiente etapa a seguir, según Watson y Rudd, [1], es el planteamiento de las alternativas de los problemas específicos plausibles para el problema primitivo. Para esto, es útil utilizar la “Descomposición Jerárquica de Douglas” como método de síntesis.

A continuación se presentan las diversas alternativas generadas según la jerarquía de decisiones propuesta por el método:

- **Nivel 1:** Debido a que las máquinas pigmentadoras de pistolas de la empresa trabajan por lotes, el sistema a implementar esta ceñido a esta condición de operación.
- **Niveles 2 y 3:** Tanto la estructura de las corrientes de entradas y salidas del proceso como la estructura de recirculados, están condicionadas a los posibles sistemas de separación planteados como alternativas en el nivel 4.

Si se considera la utilización de un precipitador electrostático, la única corriente de entrada y salida será la de la corriente gaseosa a tratar y no existirán corrientes a recircular. Por el contrario, si se utiliza una torre lavadora se debe tener presente una

corriente de entrada y salida adicional para el líquido lavador, y por lo tanto existirá una corriente de recirculación de éste, que permita su tratamiento y posterior recirculación al proceso.

- **Nivel 4:** En la Figura 1 se presentan los sistemas más comúnmente utilizados para la captación de material particulado presente en una corriente gaseosa, clasificados según unas reglas heurísticas. Por lo tanto estos equipos representan las diversas alternativas de solución del problema primitivo.

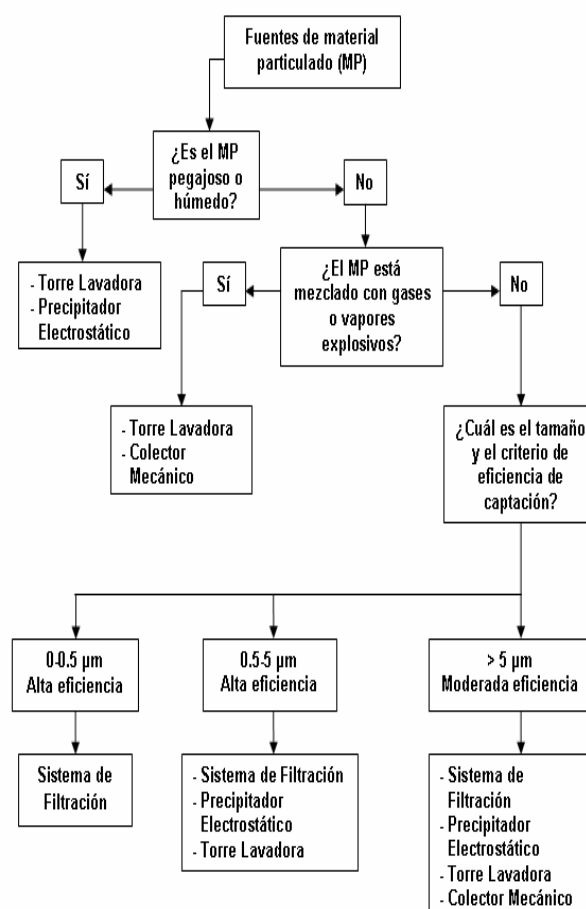


Figura 1. Diagrama de flujo para la selección del equipo más adecuado para la retención de material particulado [8]

Figure 1. Flowsheet for the most appropriate equipment selection for the particulate matter retention [8]

Existen numerosas excepciones a la aplicabilidad de la información presentada en la Figura 1, debido a las condiciones

específicas del lugar del proceso. Sin embargo, dicha información provee una guía general acerca de los usos y limitaciones de los sistemas de control de material particulado más usados industrialmente [8].

De acuerdo con la Figura 1, como la naturaleza del material particulado a separar de la corriente gaseosa es pegajoso y húmedo, los dos posibles sistemas de separación a considerar son un precipitador electrostático o una torre lavadora.

- **Subnivel 4A:** No aplica.
- **Subnivel 4B:** La recuperación de líquidos solo es aplicable al proceso que contempla la elección de la torre lavadora como equipo de separación. Para este caso, la corriente del líquido lavador debe ser tratado con el fin de eliminar el material sólido transferido desde la corriente gaseosa, y de nuevo reincorporada al proceso. Una alternativa es incorporar un filtro de tambor rotatorio en la base de la torre lavadora que vaya tratando continuamente el agua contaminada. Otra posibilidad es desviar el líquido a tratar, que cae a la base de la torre, a un tanque exterior; y someterlo a un simple proceso de filtración.
En ambos casos el fluido filtrado sería bombeado de nuevo al equipo para ser utilizado.

- **Nivel 5:** No aplica.

Análisis de los problemas específicos (alternativas de solución)

El número de alternativas de solución planteadas en el numeral 4.2 para el problema en consideración son dos: la utilización de un precipitador electrostático o de una torre lavadora en el proceso.

Como se mencionó previamente, la primera etapa en la modificación de un proceso conocido, "PM", implica la evaluación técnica de todas aquellas alternativas que parezcan más viables a llevar a cabo.

El uso de un precipitador electrostático no es muy recomendable ya que el material particulado y los solventes altamente volátiles presentes en la corriente gaseosa evacuada de la cabina de pulverización de la máquina pigmentadora son altamente inflamables; por lo que cualquier chispa eléctrica generada representaría un gran riesgo de seguridad industrial.

En contraste una torre lavadora no tiene problemas de seguridad asociados al proceso, ya que por su principio de operación minimiza los riesgos de ignición. Adicionalmente, este equipo presenta una serie de ventajas tales como:

- Eficiencias de colección altas para rangos muy amplios de partículas.
- Mantenimiento simple por la sencillez de la operación.
- Capacidad de remover partículas sólidas, aún si estas son pegajosas.
- Capacidad de manejar corrientes gaseosas a altas temperaturas y alta humedad.
- No se generan fuentes de polvo secundarias.
- Requerimientos de espacio relativamente pequeños.
- Bajos costos de instalación [8].

Además, es posible transformar, con un mínimo de modificaciones, el ducto vertical por medio del cual se evacua la corriente gaseosa contaminada en una torre lavadora.

Con respecto al sistema a utilizar para el tratamiento y posterior recirculación al proceso del líquido lavador, la opción de utilizar un filtro de tambor rotatorio no es muy aconsejable, debido a las restricciones de espacio con las que cuenta el entorno circundante a la máquina pigmentadora; lo que haría muy tedioso el mantenimiento y limpieza del equipo. Por lo tanto es más recomendable utilizar un tanque exterior con una malla de filtración que permita separar el material particulado retenido en el agua de proceso.

Selección de una solución

Como se mencionó en el numeral anterior, de acuerdo a las características y ubicación en planta de la máquina pigmentadora, y a la naturaleza de los productos químicos aplicados, el equipo más adecuado a implementar para

solucionar el problema inicialmente planteado es una torre lavadora; que adicionalmente cuenta con un tanque exterior de tratamiento para el fluido de trabajo. En la Figura 2 se presenta el diagrama de bloques del proceso modificado.

La “Heurística”, otro método de síntesis de procesos, ratifica dicha selección; ya que según una consulta realizada al SENAI - Centro Tecnológico do Couro (Servicio Nacional de Aprendizaje Industrial - Centro Tecnológico del Cuero), del Brasil, las torres lavadoras son los equipos más adecuados y más comúnmente usados industrialmente para la captación de partículas de acabado que son lanzadas al ambiente, por medio de los extractores de las máquinas pigmentadoras de pistolas [8].

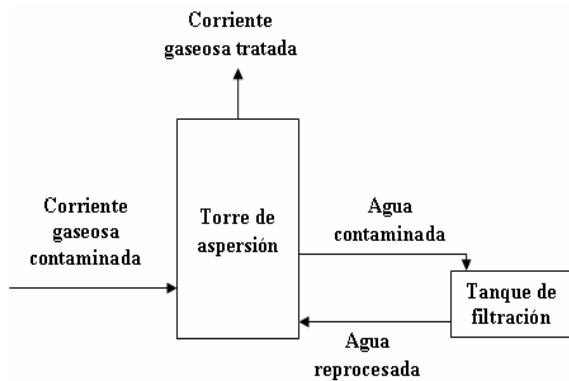


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso modificado

Figure 2. Block flowsheet of modified process

5. RESULTADOS

La simulación o la experimentación in situ del proceso obtenido después de aplicar un método de síntesis, es fundamental para lograr su aprobación definitiva [3]. Es por esta razón que a continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la implementación del sistema seleccionado.

Sistema implementado

Una torre lavadora, más concretamente una torre de aspersión, fue implementada en una de las máquinas pigmentadoras de pistolas de la cortimbre (ver figuras 3 y 4), para la retención

del material particulado presente en la corriente gaseosa evacuada, proveniente de la cabina de pulverización.

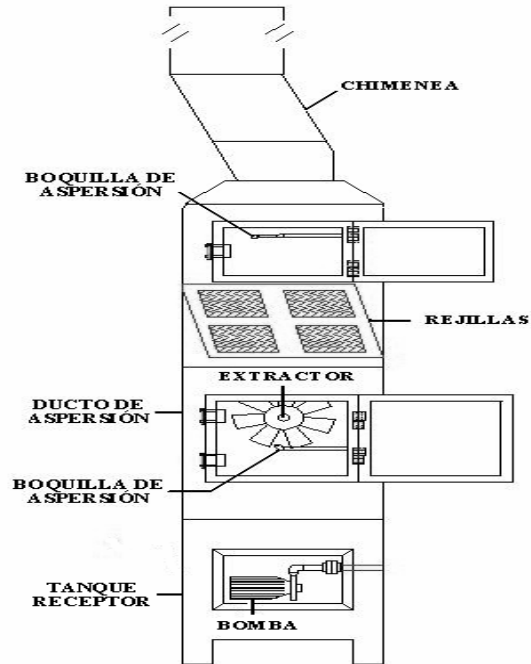


Figura 3. Esquema de la torre de aspersión (vista frontal) [8]

Figure 3. Spray tower scheme (frontal view) [8]

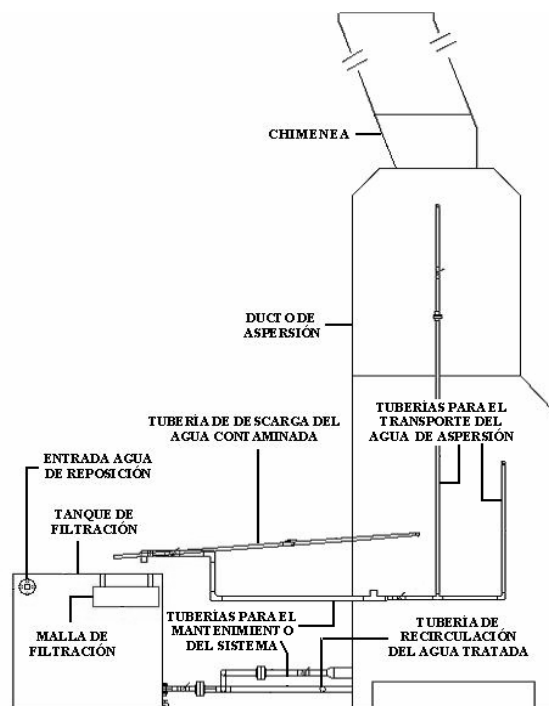


Figura 4. Esquema del sistema (vista lateral) [8]

Figure 4. System scheme (side view) [8]

En la Tabla 1 se presenta las características de operación del sistema.

Tabla 1. Características de operación del sistema [8]
Table 1. System operation characteristics [8]

Eficiencia promedio de captación de sólidos	37,4 %
Velocidad de la corriente gaseosa	3,2 m/s
Caudal de los gases tratados	291 m ³ /min
Caudal del agua descargada en la torre	0,262 L/s
Relación líquido/gas	0,054 L/m ³ gas
Consumo promedio de agua (pérdidas)	63 L/h
Humedad promedio de los sólidos captados en las rejillas	63,2%
Humedad promedio de los sólidos captados en la malla de filtración	67,4%
pH promedio del agua recirculada en el proceso	6,5
Densidad promedio del agua recirculada en el proceso	1010 kg/m ³
Consumo de potencia del conjunto bomba-extractor	11,58 Kw

Eficiencia del sistema implementado

A través de un seguimiento y control a la cantidad de producto químico de acabado aplicado en la máquina pigmentadora de pistolas y a la cantidad de material particulado retenido por el sistema implementado, se calculó la eficiencia de captación de éste. Los balances de masa necesarios para el cálculo de la eficiencia del sistema se presentan a continuación:

El 60% del producto de acabado aplicado en la máquina pigmentadora, η , queda retenido en el cuero. La cantidad de este que se desperdicia, α , esta dada por:

$$\alpha = 0.4\eta \quad (1)$$

De la cantidad total de producto desperdiciado, un 40% de este resulta depositado dentro de la cabina de pulverización y el porcentaje restante, β , es succionado por un extractor hacia la torre de aspersión:

$$\beta = 0.6\alpha \quad (2)$$

Según la clase del producto de acabado aplicado (resina, hidrolaca, anilina, pintura,

etc), la cantidad de sólidos presentes en cada mezcla es diferente.

Por lo tanto, conociendo la clase y la cantidad de producto químico aplicado, junto con la cantidad de este desperdiciado, se puede cuantificar la corriente másica de sólidos que entra a la torre de aspersión, ε .

Luego, a través de la relación entre la cantidad de sólidos que entran a la torre de aspersión y los retenidos por esta, λ , se puede estimar la eficiencia del equipo a través de la siguiente expresión:

$$\varphi = \left(\frac{\lambda}{\varepsilon} \right) \times 100 \quad (3)$$

Por medio de los balances anteriormente planteados, se calculó una eficiencia másica de retención de sólidos para el sistema implementado del 37.4%.

Para ser un diseño preliminar, dicha eficiencia se puede considerar buena desde el punto de vista experimental, considerando la reducción de la concentración de material particulado que es expulsado a la atmósfera. Sin embargo, según los datos teóricos reportados por la literatura, la eficiencia para una torre de aspersión está a alrededor del 80%, lo que equivale al doble de la eficiencia calculada para el diseño implementado. La gran diferencia entre estos dos valores de eficiencia se debe a una gran variedad de parámetros de diseño y operación, tales como:

- La relación entre los flujos volumétricos del líquido lavador y la corriente gaseosa (L/G).
- La configuración geométrica de la torre.
- La ubicación y el número de boquillas de aspersión.
- El tiempo de residencia y las velocidades de la corriente gaseosa.
- La longitud del ducto de aspersión.
- El tamaño de las gotas asperjadas.
- El grado de solubilidad de las partículas en el agua [8].

Debido a que el análisis del desempeño de torres de aspersión para procesos de remoción de

partículas sólidas de corrientes gaseosas no ha sido profundizado en estudios previos, es difícil conocer el valor de los parámetros óptimos anteriormente mencionados para la obtención de una máxima eficiencia. Por lo tanto, se deben realizar ensayos hidrodinámicos experimentales para tal fin [8].

Comparación entre el antes y después del sistema implementado

• **Antes del sistema implementado**

Durante el funcionamiento de la máquina pigmentadora de pistolas, los diversos productos de acabado aplicados que no se lograban retener sobre el cuero, saturando el ambiente interior de la cabina de pulverización, eran evacuados en una corriente gaseosa hacia el ambiente, por medio de un extractor que comunicaba dicha cabina con un ducto vertical, al final del cual estaban ubicadas un total de cuatro rejillas engrasadas para la captación del material particulado. Al superar las rejillas, la corriente gaseosa todavía cargada con una gran cantidad de sólidos y de solventes volátiles era expulsada al ambiente por medio de una chimenea; contribuyendo a la contaminación atmosférica producida por la curtiembre y a la generación de continuas quejas por parte de la comunidad circundante a la empresa [8].

• **Después del sistema implementado**

Actualmente, los productos de acabado aplicados que no se logran retener sobre el cuero, son evacuados en una corriente de aire por un extractor hacia un ducto o torre de lavado, que utiliza agua como líquido lavador; en el cual por medio de dos boquilla de aspersión, se transfiere gran cantidad de partículas sólidas transportadas inicialmente por la corriente gaseosa a la corriente líquida. Una de estas boquillas dirige un chorro de agua directamente hacia el extractor, el cual pulveriza y distribuye el líquido por toda la cámara de lavado. La otra boquilla se encarga de esparcir el agua en forma de ducha sobre las

cuatro rejillas que cubren el área seccional de la torre, con el fin de lograr una uniforme distribución del fluido. Después de ser tratado el aire contaminado, este es expulsado al ambiente a través de una chimenea de evacuación.

El agua, utilizada como fluido de trabajo de la torre puesta en operación, es almacenada en un tanque receptor ubicado en el interior de esta; y es evacuada por reboce a un tanque exterior de filtración para su tratamiento y posterior recirculación al proceso [8].

De esta manera se modificó un proceso existente, contribuyendo a una producción más limpia y amigable con el medio ambiente y con la comunidad circundante a la empresa.

6. CONCLUSIÓN

Numerosos principios heurísticos son usados en el desarrollo del diseño de un proceso, pero en términos generales la actividad es toda un arte, la cual interrelaciona los conocimientos científicos con las aptitudes de astucia y recursividad inherentes al ingeniero. Esta combinación entre ciencia y arte en la actividad creativa, mediante el desarrollo de un procedimiento, permitió generar una solución a un problema particular. De esta forma, el proceso de evacuación de los productos de acabado que no se lograban retener sobre el cuero en una máquina pigmentadora de pistolas de una curtiembre, fue modificado.

Con el objetivo principal de reducir la concentración de material particulado expulsado a la atmósfera, de acuerdo a unas restricciones técnicas, locativas y de seguridad, y a las características del proceso existente, se seleccionó e instaló una torre de aspersión, como el sistema más adecuado a implementar. Los resultados obtenidos experimentalmente fueron satisfactorios, considerando el carácter preliminar del diseño y la gran cantidad de limitaciones presentes en su concepción y ejecución.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa Curtimbres de Itagüí S.A; en especial al

Ingeniero Hernán Alonso Ramírez, Jefe del departamento de Investigación y Desarrollo de Acabados de dicha empresa.

REFERENCIAS

- [1] RUDD, D.F., WATSON, Ch.C. Estrategia en Ingeniería de Procesos. Editorial Alhambra. Madrid, 1976.
- [2] AGUIRRE, J. Ingeniería de Procesos Químicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2004.
- [3] SIROLA, J.J. Strategic Process Synthesis: Advances in the Hierarchical Approach. Computers & Chemical Engineering, 20, 1637-1643, 1996.
- [4] DOUGLAS, J.M. A Hierarchical Decision Procedure for Process Synthesis. AIChE Journal, 31, 353-362, 1985.
- [5] LI, X., KRASLAWSKI, A. Conceptual Process Synthesis: Past and Current Trends. Chemical Engineering and Processing, 43, 589-600, 2004.
- [6] WESTERBERG, A.W. Synthesis in Engineering Design. Computers & Chemical Engineering, 13, 365-376, 1989.
- [7] DOUGLAS, J.M. Conceptual Design of Chemical Processes. McGraw-Hill International Editions. Singapore, 1988.
- [8] KAZES, S. Diseño Preliminar de un Sistema Para la Retención del Material Particulado y de Algunas Sustancias Gaseosas Contaminantes Proveniente de la Evacuación de los Productos de Acabado no Retenidos Sobre el Cuero. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2007.