

# **A model proposition for strategies definition in manufacture processes improvement in reference to its environment impact**

**Fernando Espinosa F. y Gonzalo Salinas S.**

*Departamento de Tecnologías Industriales, Universidad de Talca. 2 Norte 685, Talca, Chile  
fespinos@utalca.cl, gsalinas@utalca.cl*

## **Abstract**

The model in this paper has its origin in the analogy between the degradation that suffers the energy in any transformation and the degradation that it suffers the environment for effect of the industrial activities, in anyone of its stages, this is in the natural resources extraction, in the transformation activity and in those poured of mass residuals and energy. It outlines a form of generating efficiency indicators in the transformation process, keeping in mind the contamination variable. Their bases are in thermodynamic principles, in systems analysis and in simulation models

**Key words:** Contamination, systems analysis, indicators, manufacture improvement.

## **Proposición de un modelo para definición de estrategias de mejoramiento de los procesos de manufactura en referencia a su impacto en el ambiente**

### **Resumen**

El modelo que se desarrolla en este trabajo tiene su origen en la analogía entre la degradación que sufre la energía en cualquier transformación de ésta y la degradación que sufre el medio ambiente por efecto de las actividades industriales, en cualquiera de sus etapas, esto es en la extracción de los recursos naturales, en la actividad de transformación y en los vertidos de residuos másicos y energéticos. Se plantea, en forma similar al análisis de la Segunda Ley de la Termodinámica, en la forma de Kelvin-Planck, un modelo de eficiencia ambiental, en términos de masa y energía (ya sea tanto como energía pura como asociada a la masa), consumida por la industria y transformada por esta en bienes y residuos no utilizables (contaminantes). Se complementa con un análisis más profundo del problema adaptando modelos usados en análisis de sistemas y simulación

**Palabras clave:** Contaminación, análisis de sistemas, indicadores, mejoramiento de manufactura.

### **Introducción**

Debido a que se está imponiendo la premisa “el que contamina paga”, concepto que democratiza el costo ambiental y que a la vez implica internalizarlo en los costos de transformación de los recursos naturales en bienes manufacturados, esta situación plantea a la industria en ge-

neral y a la administración industrial en particular un nuevo desafío: reducir y por ende optimizar sus consumos de materiales y energía [1].

La finalidad del industrial es reducir hasta donde sea posible el impacto en sus costos de fabricación, los costos de descontaminación, para mantener así los niveles de competitividad. O sea el industrial deberá tratar de mantener o elevar lo

mínimo posible el costo final de los bienes que él produce, esto vía la optimización de procesos [2].

Este escenario, en cierta manera ha trasladado el centro de gravedad de la administración industrial, al considerar una nueva restricción, que es el costo ambiental [3], lo que ha derivado en la necesidad de replantear los modelos tradicionales de planificación y optimización.

El modelo que muestra este trabajo, plantea una nueva forma de generar indicadores de eficiencia en el proceso de transformación, teniendo en cuenta la variable contaminación. Sus bases están en los principios termodinámicos, en el análisis de sistemas y en los modelos de simulación.

### Modelo Energético Generatriz

En términos más generales es posible definir contaminación como la introducción en el medio de cualquier sustancia, ya sea de origen natural o artificial, que tenga algún efecto perjudicial para los seres vivos que existen en el ambiente donde fue vertido.

Por lo tanto, el grado de contaminación de un medio ambiente puede evaluarse a través de la presencia de concentraciones anormales ya sea por exceso o defecto de diversas sustancias químicas y/o microorganismos y/o diversas ma-

nifestaciones del nivel de energía que generan alteraciones indeseadas a los ecosistemas [4].

Por lo general, estas alteraciones son producto de las diversas actividades económicas y en particular las de transformación de recursos naturales en bienes de consumo, función que realiza la actividad industrial, cuyo mecanismo de acción es adicionar "energía a la materia prima para transformarla en un producto o bien de consumo" [5].

Si se considera que la industria tiene por objeto la transformación de las materias primas en bienes manufacturados mediante el agregado de energía en diversas formas, la que también es tomada desde el ambiente y por ende pasa a ser una forma de materia prima, esto permite generar un modelo que cuantifica la eficiencia ambiental de una determinada industria.

Se puede plantear en forma similar al análisis de la Segunda Ley de la Termodinámica, en la forma de Kelvin-Planck, un modelo de eficiencia ambiental, en términos de masa y energía (ya sea tanto como energía pura como la asociada a la masa), consumida por la industria y transformada por esta en bienes y residuos no utilizables (contaminantes), al cual se le denominará modelo generatriz, el que se plantea gráficamente en la Figura 1.

*Modelo de Kelvin-Planck*

*Modelo de Eficiencia Ambiental*

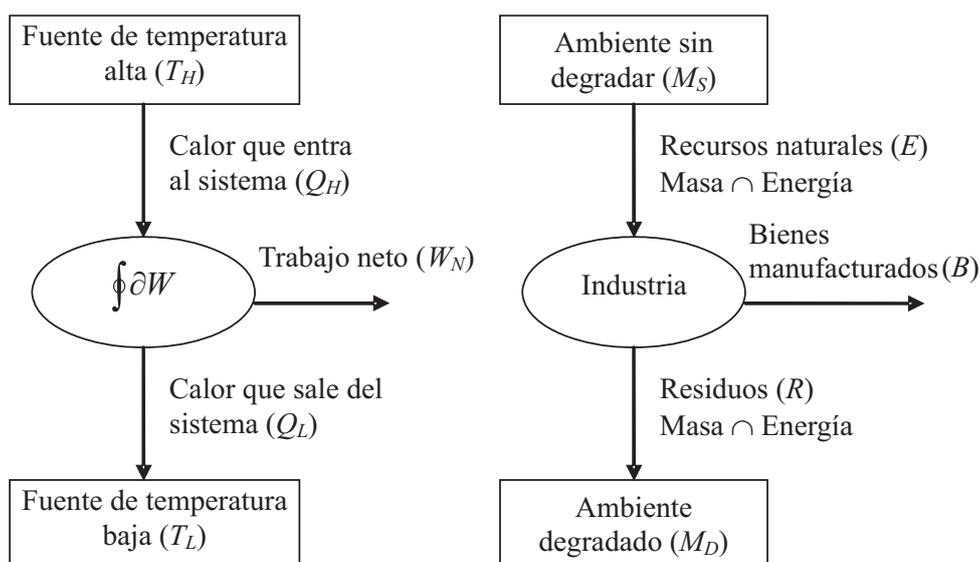


Figura 1. Modelo energético generatriz.

El modelo generatriz se plantea a partir de la analogía entre la degradación que sufre la energía en cualquier transformación de ésta y la degradación que sufre el medio ambiente por efecto de las actividades industriales, en cualquiera de sus etapas, esto es en la extracción de los recursos naturales, en la actividad de transformación y en los vertidos de residuos másicos y energéticos.

En su forma más amplia el modelo considera, en un primer nivel, al proceso de transformación como una caja negra y se concentra en identificar y evaluar las entradas y salidas a ésta. Esta forma permite medir la eficiencia de la transformación de la masa y energía con referencia a la emisión de contaminantes ambientales.

De todo lo anterior se desprende que el medio ambiente se encuentra en un proceso de continua degradación, al igual que las transformaciones energéticas, y por ende se generaría un incremento de la entropía, la que se puede asociar al incremento de la contaminación ambiental.

De este modo, se tiene a partir de la Segunda Ley de la Termodinámica la definición de rendimiento térmico como [6]:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = \frac{|W_N|}{|Q_H|}, \quad (1)$$

donde:

$\eta_{\text{térmico}}$  : Rendimiento térmico

$Q_H$  : Energía agregada en forma de calor

$Q_L$  : Energía cedida en forma de calor

$W_N$  : Trabajo mecánico neto transformado.

Donde el rendimiento se puede plantear en su forma más elemental como la producción de trabajo mecánico neto dividido por el consumo de energía para la producción de la misma. Por otro lado, el trabajo neto corresponde al calor añadido a la sustancia de trabajo desde una fuente externa de calor menos el calor cedido como pérdida termodinámica.

Por su analogía, el rendimiento ambiental quedaría como sigue:

$$\eta_{\text{ambiental}} = \frac{E - R}{E} = \frac{B}{E}, \quad (2)$$

donde:

$\eta_{\text{ambiental}}$ : Rendimiento ambiental

$E$  : Recursos naturales utilizados

$R$  : Contaminación

$B$  : Bien manufacturado final.

En este caso el trabajo neto es el bien manufacturado final ( $B$ ) y corresponde a la diferencia, medida en términos de energía y masa, entre los recursos naturales de entrada ( $E$ ) a la producción y lo que se envía al medio ambiente en forma de contaminación ( $R$ ).

El concepto de ambiente no degradado del modelo, corresponde al estado de degradación inicial que poseía el ambiente cuando se comienza el proceso de manufacturación, mientras que el ambiente degradado es cuando egresan los bienes y son vertidos los residuos de la industria. Existe una diferencia temporal entre ambos estados de degradación.

Dadas las dificultades que presenta el cuantificar en conjunto la masa y la energía, se debe inicialmente considerar la existencia de dos formas de rendimiento ambiental, la primera respecto a la masa, la que es constante y la segunda respecto de la energía la que debe considerar además las exergías de las transformaciones.

En la elaboración de este modelo se considera que la demanda del bien es una variable exógena, sobre la cual no hay poder de decisión para variar sus condiciones, (lo cual en la realidad la empresa si puede influir a través de publicidad, variaciones de precios u otras estrategias) y que las variables restantes si pueden ser optimizadas mediante decisiones y acciones de los administradores del sistema industrial. Por tanto donde el análisis se concentra es en determinar las relaciones de las variables industriales y el estado de estas cuando son sometidas a cambios.

## Modelo Dinámico del Sistema Productivo

La dinámica de un sistema se refiere a la representación del mundo real en un modelo simbólico, para estudiar su comportamiento con el fin de introducir todos los mecanismos que lo hagan operativo y sea una herramienta eficaz en el ámbito de su aplicación.

El modelamiento conceptual de un sistema es la primera fase del desarrollo, y es ahí donde se

fija el alcance de este al seleccionar las herramientas que darán solución al problema planteado. En la segunda fase hay que darles forma a estos modelos, de tal manera que sean manejables y útiles a la toma de decisiones [7].

Uno de los requisitos para la representación es que entregue una pauta clara que permita, más adelante, planificar todo el proceso y darle mayor operatividad a este [8, 9].

El modelo generatriz identifica las entradas y salidas del sistema de manufactura y es en el modelo dinámico donde ya se comienza a especificar en detalle las relaciones de cada una de las variables que se manejan en el sistema de manufactura (Figura 2). El modelo dinámico se puede plantear a distintos niveles de desagregación dependiendo del tipo de variables que lo integren y/o resultados que se deseen obtener.

Para el caso de este trabajo, el modelo dinámico se expondrá sólo a primer nivel, como lo muestran las Figuras 2 y 3, ya que el objetivo es mostrar cómo se puede generar un modelo de estudio, un lenguaje de tipo simbólico y un conjunto de índices para evaluación para distintos escenarios alternativos en el manejo de emisión de contaminantes industriales

El análisis en esta parte del diseño del sistema se realiza en dos etapas: análisis cuantitativo y análisis cualitativo. En la primera etapa se diseña el mapa del sistema (diagrama de causa y

efecto) con el propósito de identificar las relaciones de los componentes del sistema y usarlas tanto para explorarlo como para analizarlo. El diagrama se desarrolla en conjunto con los usuarios del sistema, a fin de que todo el proceso mental realizado quede explicitado y sea compatible con sus expectativas y estrategias de aplicación.

La segunda etapa tiene por propósito definir la forma como será recopilado, evaluado, manejado y entregado, todo el conjunto de datos, antecedentes e información elaborada. Aquí se termina de dar la estructura al sistema, o sea la manera como el proceso y la información se relacionan, hacia delante, para entregar resultados, y hacia atrás para medir desviaciones.

El estudio de la dinámica del sistema está centrado en el uso de diagramas como medio para transmitir los modelos mentales y discutir los cambios. Este tipo de medio es útil porque transmite con menos ambigüedad y es más condensado que una descripción escrita [10, 11].

## Estructura del Proceso

Este método está basado en la premisa que el sistema está compuesto de dos estructuras básicas: estructura del proceso y estructura de la información. Además hay flujos de recursos y de información respectivamente.

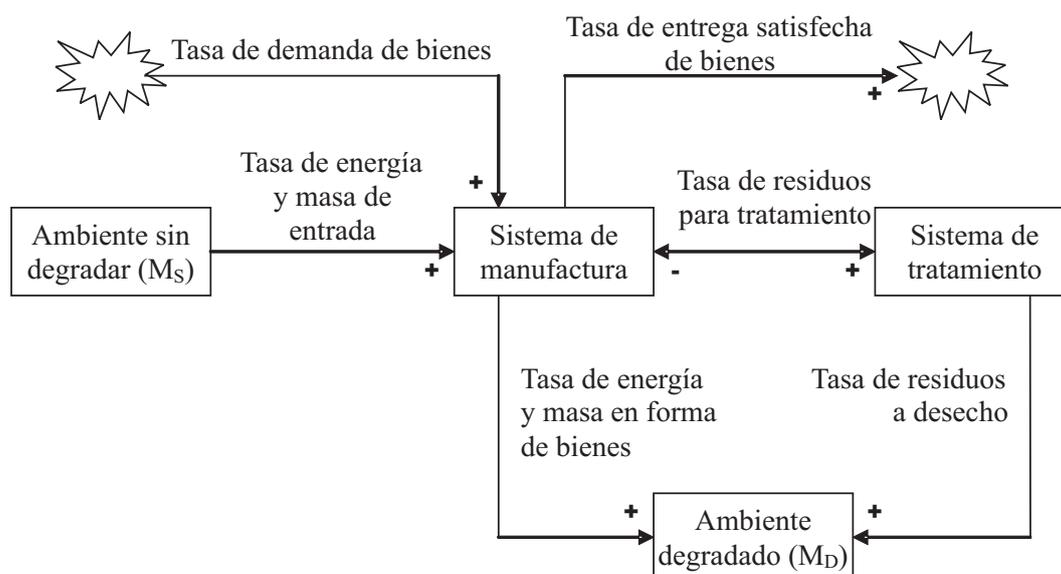


Figura 2. Modelo dinámico sin recuperación de desechos.

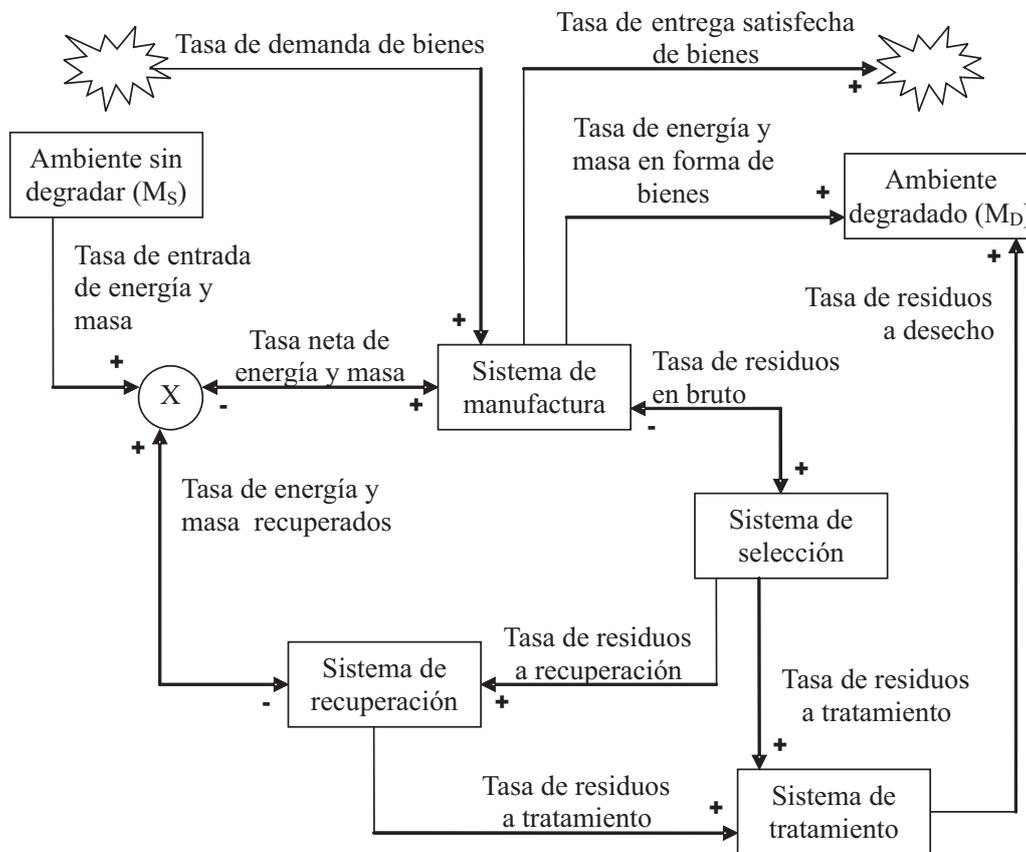


Figura 3. Modelo dinámico para un proceso de manufacturación con recuperación de desechos.

Para crear la estructura del sistema es necesario reconocer cual es el proceso fundamental del sistema que convierte los recursos entre los distintos estados. La palabra recurso se refiere tanto a materiales, personas, dinero, órdenes, bienes, conocimientos, etc. El estado de un recurso puede ser definido como nivel de disponibilidad de éste, en el momento del análisis de las condiciones relevantes del momento o para el propósito del modelo [12].

La estructura del proceso del sistema de manufacturación, la cual es representada por el flujo de recursos se realiza a partir de estados y tasas de variación e influencia de estos. Esta forma de expresión tiene la particularidad que puede simular el comportamiento interactivo de cada estado, que se muestra encerrado en los rectángulos, a través de la polaridad de la influencia de la variación de cada tasa. Por consecuencia al análisis para determinar donde introducir mejoras en el sistema se ve altamente simplificado por el uso de este método.

Para confeccionar este diagrama hay que tener en cuenta la situación no deseada de cada estado en lo que respecta a la emisión de contaminantes o elementos perjudiciales al medio ambiente, y en base a esto compatibilizar la definición de las tasas.

En el diagrama se puede analizar el conjunto de interrelaciones como sigue:

- Un aumento en la tasa de demanda por productos manufacturados, tiene una influencia positiva (aumento) sobre el sistema de manufactura provocando en él un aumento en la demanda de masa y energía. El total de requerimientos se obtendría de la suma de los insumos provenientes del ambiente más aquellos que se recuperan a partir de los residuos del proceso de manufactura.
- La tasa de residuos en bruto está en relación directa con el ritmo del proceso de fabricación y ésta tendrá una influencia positiva sobre el sistema de selección, exigién-

dole a ésta mayor eficiencia, a fin de evacuar a tiempo los residuos del sistema de manufactura. Un aumento en la tasa de residuos tiene una influencia negativa (disminución) sobre el ritmo de producción ya que entorpece el área de trabajo, detrima el ambiente laboral y perjudica al equipamiento.

- Un aumento en la tasa de residuos a tratamiento y a recuperación, producto de un aumento en la tasa de consumo de energía y masa, tiene influencia positiva sobre el sistema de tratamiento y recuperación respectivamente, ya que les exige a éstos pro-

cesar un mayor volumen de residuos antes de enviarlos al ambiente o reutilizarlos.

## Definición de las Estrategias

En el diseño de los sistemas el primer componente manejado es la información seleccionada para el usuario, y el segundo es la estrategia para la cual va a usar dicha información [13]. Por esta razón las variables temporales en los sistemas están usualmente referidas como políticas, estrategias o variables de decisión, tal como se muestra en la Figura 4.

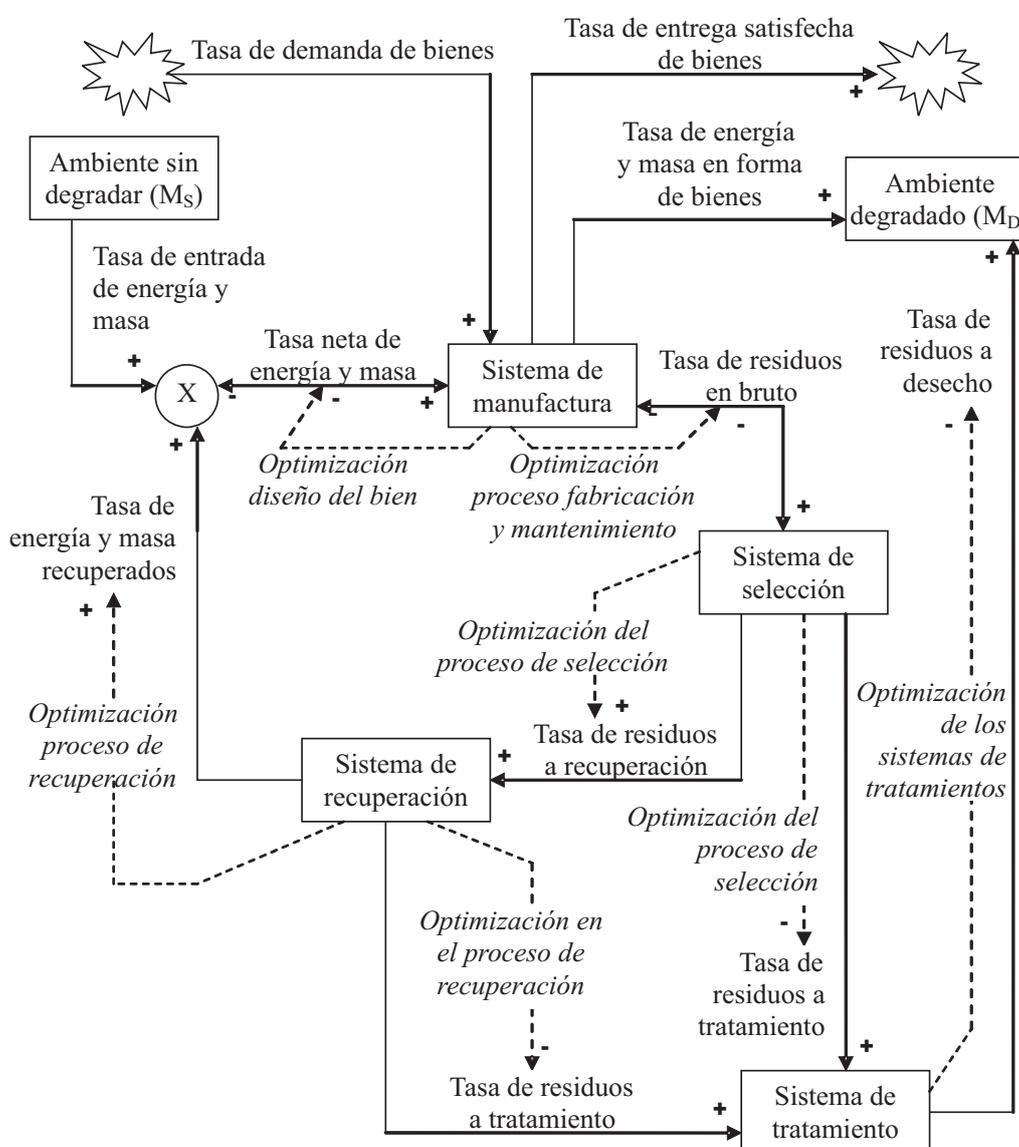


Figura 4. Estructura de las estrategias para un sistema de manufactura con emisión de contaminantes.

A menudo el conjunto de variables temporales involucra objetivos bien definidos para los niveles e implementación de estrategias para eliminar cualquier discrepancia entre el objetivo y el valor actual del objetivo.

La idea principal en los modelos con ciclos cerrados es que el flujo de información una los niveles con las tasas a través de antecedentes pertinentes y que especifiquen como las tasas cambian en el futuro al cambiar las cantidades de recursos en los niveles.

Para minimizar el efecto de la emisión de contaminantes en los procesos de manufactura, las variables técnicas a considerar deben tener la factibilidad de ser optimizadas [14]. Lo anterior requiere que el usuario del sistema conozca a cabalidad el funcionamiento de cada sistema definido al interior de la industria

El diagrama de la estructura, a primer nivel, de información que se muestra en la Figura 4 muestra como se definen aquellas áreas que son perfectibles dentro de todo el proceso industrial.

En la definición de los bucles de retroalimentación, hay que tener presente el efecto no deseado y en base a esto plantear la acción que minimice dicho efecto (efecto negativo sobre otro negativo da como resultado uno positivo). Así, sucesivamente para cada tasa se plantea, según lo muestra la Figura 4.

- La optimización del diseño del bien que produce la industria provoca un efecto negativo sobre la tasa de energía y masa requerida, al racionalizar la demanda de estos. Los puntos que pueden ser mejorados en el sistema de manufactura, entre otros, están selección de materiales, métodos y tiempo de fabricación, capacitación del personal, almacenamiento de productos, etc.
- Para disminuir la tasa de residuos en bruto, la retroalimentación va vía optimización del proceso de fabricación lo que se puede traducir en control de pérdidas, mantenibilidad del equipamiento, confiabilidad de la línea de producción, equilibrio de las líneas, etc. Esto da como resultado una disminución de la tasa de energía y masa que llega al sistema de selección, redundando al final

en la disminución de los residuos que irán al ambiente.

- De la misma forma para el resto de los procesos que tratan a los residuos, donde el mejoramiento cualitativo y cuantitativo de los equipos que los tratan provocan sobre la tasa de residuos los efectos destacados en el esquema mostrado en la Figura 4.

Cada uno de los parámetros que se nombraron pueden ser descritos matemáticamente, dando un modelo que puede ser simulado y entregar valores que permitirán apoyar el proceso de toma de decisiones en lo referente al manejo de emisiones de contaminantes.

Entrar en detalles implica pasar a niveles mas desagregados del modelo, y esto es parte de la labor del administrador que determinará hasta que punto lo hace. Es un problema de costo-beneficio.

## Definición de los Índices

El índice es un valor de referencia que comparado con otro sirve de descriptor de tendencias o situaciones. En general los índices ayudan a saber cuales son las condiciones de trabajo reinantes y sirven por lo tanto de apoyo a la hora de la toma de decisiones.

La mejor forma de medir el impacto de introducir mejoras en el sistema de manufactura es mediante el uso de índices, o sea medir cuán mejor (o peor) es la acción tomada en referencia a la minimización de la emisión de contaminantes.

Al comienzo se definió el rendimiento ambiental ( $\eta_{ambiental}$ ) del sistema en su totalidad como:

$$\eta_{ambiental} = \frac{(masa \cap energía)_{entrada} - (masa \cap energía)_{desecho}}{(masa \cap energía)_{entrada}} \quad (3)$$

Similarmente, para el sistema de manufactura el indicador se define como:

$$\eta_{sist. manuf} = \frac{(masa \cap energía)_{neta} - (masa \cap energía)_{res. bruto}}{(masa \cap energía)_{neta}} \quad (4)$$

Además se pueden definir relaciones que midan el consumo unitario de masa y energía ( $\dot{\omega}$ ) tomada desde el ambiente, con la finalidad de medir la efectividad del rediseño del bien y del sistema de recuperación de residuos:

$$\dot{\omega} = \frac{(masa \cap energía)_{entrada}}{cantidad\ de\ bienes\ manufacturados}. \quad (5)$$

Similarmente para cada subsistema integrante del sistema productivo, se pueden definir razones o índices que sean de utilidad para el análisis dinámico del sistema.

### Comentarios Finales

Conviene hacer notar que tanto los bienes manufacturados (masa y energía) como los residuos desde el punto de vista material se toman de un ambiente no degradado y ambos son "vertidos" y/o entregados a un ambiente degradado, de modo que la tasa de demanda, la tasa de entrega de bienes y su grado de satisfacción se encuentran asociados a las características socioculturales de cada sociedad y por ende entra en el ámbito del marketing.

De hecho como los bienes finales regresan con un mayor nivel energético al ambiente o con otra estructura o composición, también son una forma de contaminación. Por otro lado, una mayor demanda y un menor grado de satisfacción son ampliamente negativos hacia el ambiente.

En la práctica muchos de los bienes manufacturados no están destinados a la satisfacción de las necesidades básicas de la humanidad y de sus estructuras sociales, tales como alimentación y el abrigo, por ende el nivel de consumo o tasa de demanda, es variable y puede verse alterada, ya sea aumentada o disminuida por los cambios culturales, educacionales, de marketing y principalmente por la concepción que de la ciencia, la tecnología y sus relaciones con la sociedad tenga el grupo humano que conforma el tejido social.

Modelar un sistema de manufactura, teniendo en cuenta el factor contaminación, es una tarea que debe ser enfrentada por un equipo multidisciplinario a fin de definir con propiedad las variables involucradas en el proceso, sus pesos

relativos y las expresiones matemáticas que los describen.

### Referencias Bibliográficas

1. Davies A. J., Kochhar A. K. "A framework for the selection of best practices", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20 No. 10 (2000) pp. 1203-1217.
2. Brassler A., Schneider H. "Valuation of strategic production decision". *Int. J. Production Economics* 69 (2001) pp. 119-127.
3. León-Santana, M., Hernández, J.M. "Optimum management and environmental protection in the aquaculture industry". *Ecol. Econ.* (2007), doi:10.1016/j.ecolecon.2007.05.006.
4. Mahimairaja S., Bolan N.S., Adriano D.C., Robinson B. "Arsenic Contamination and its Risk Management in Complex Environmental Settings" *Advances in Agronomy Volume* 86, (2005), pp. 1-82.
5. Moran M. y. Shapiro H, "Fundamentos de termodinámica técnica", Ed. Reverte, 2004.
6. Fiksel J., "Ingeniería de diseño medioambiental", DFE. Ed. Mc Graw Hill, (1997).
7. Jambekar A. B., "A systems thinking perspective of maintenance, operations, and process quality", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 6 No. 2, (2000), pp. 123-132.
8. Towill D. R., "Industrial dynamics modelling of supply chains", *Logistics Information Management Volume* 9 Number 4, (1996).
9. Corben D. A., Wolstenholme E. F., Stevenson R. W., "A product improvement case study using systems modeling", *Executive Development*, Vol. 8 No. 4, (1995).
10. Almasri M.N., Kaluarachchi J.J. "Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds", *Journal of Hydrology* 343, (2007), pp. 211-229.
11. Almasri M.N. "Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework", *Environmental Impact Assessment Review* 27, (2007) pp. 220-242.
12. Wolstenholme E., "System enquiry: a system dynamics approach", Ed. Wiley, 1990.

13. Okumus F., "A framework to implement strategies in organizations", *Management Decision* Vol. 41 No. 9, (2003), pp. 871-882.
14. Krook J., Martensson A., Eklund M., Libiseller C. "Swedish recovered wood waste: Linking regulation and contamination",

*Waste Management* (2007), doi:10.1016/j.wasman.2007.03.010.

Recibido el 25 de Septiembre de 2006  
En forma revisada el 09 de Diciembre de 2007