

MODELACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN PARCIAL DE ENVASES DE TETRA PAK

JORGE MARIO OBANDO*
MANUELA ESCOBAR**

RESUMEN

En el presente artículo se estudian el patrón de consumo, las expectativas y satisfacción de la población de Medellín con los envases de Tetra Pak, el tratamiento que se les da cuando son descartados y la conducta que se seguiría, conociendo que el Tetra Pak es reciclable; luego, se modela el procedimiento para recuperar parcialmente esos desechos de Tetra Pak y comercializarlos como bienes intermedios, aptos para ser reintegrados dentro de diversos procesos productivos. Se estudian varias políticas de operación mediante un modelo de simulación de eventos discretos construido en Extend.

PALABRAS CLAVE: envases Tetra Pak; reciclaje; simulación por eventos discretos; variables de estado; variables de decisión; parámetros del sistema; criterio de desempeño.

MODELING THE PARTIAL RECOVERY PROCESS OF TETRA PAK PACKAGES

ABSTRACT

In this paper we study the consumption pattern, expectations and satisfaction of the population of Medellín with Tetra Pak packages, the treatment given to them now when they are discarded and the conduct to be followed, knowing that the Tetra Pak is recyclable, then the process to recover partially debris from Tetra Pak is modeled and marketed as intermediate goods, eligible to be reinstated within various production processes. Several operating policies through a discrete event simulation built in Extend are studied.

* Ingeniero Administrador, EIA; Magíster en Estadística, Universidad Nacional de Colombia. Profesor de Ingeniería Administrativa. EIA. pjobando@eia.edu.co

** Estudiante de Ingeniería Industrial, Escuela de Ingeniería de Antioquia. inmaescs@eia.edu.co

KEY WORDS: Tetra Pak packaging, recycling, discrete event simulation, state variables, decision variables, system parameters, performance criteria.

MODELAÇÃO DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO PARCIAL DE EMBALAGENS TETRA PAK

RESUMO

No presente artigo se estudam o padrão de consumo, as expectativas e satisfação da população de Medellín com as embalagens Tetra Pak, o tratamento que se lhes dá quando são descartadas e a conduta que se seguiria, conhecendo que o Tetra Pak é reciclável; depois, se modela o procedimento para recuperar parcialmente esses resíduos de Tetra Pak e comercializá-los como bens intermédios, aptos para ser reintegrados dentro de diversos processos produtivos. Estudam-se várias políticas de operação mediante um modelo de simulação de eventos discretos construído em Extend.

PALAVRAS-CÓDIGO: embalagens Tetra Pak; reciclagem; simulação por eventos discretos; variáveis de estado; variáveis de decisão; parâmetros do sistema; critério de desempenho.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Sistema, simulación y reloj

El concepto de modelación, en el que está basada la simulación, se ha usado por muchos años. Algunos ejemplos de modelos históricos son la segunda ley de Newton, el modelo de Kepler del Universo e incluso la teoría de la relatividad de Einstein. Sin embargo, sólo con la creación del computador, este concepto empezó a aplicarse a casi todos los aspectos del entorno, en campos tan diversos como los negocios, la política y hasta la ingeniería nuclear, que ha sido analizada exitosamente con el uso de la simulación (Funk y Wagnall, 1992, p. 2).

Parte central de toda simulación es el sistema, definido por Funk y Wagnall como: “una colección ordenada de principios lógicamente relacionados, hechos u objetos”. Dentro del contexto de la simulación, los sistemas se entienden como una colección

de objetos con unas relaciones e interacciones bien definidas entre ellas, y además se clasifican de muchas formas, por ejemplo: los que se dan de forma natural y los que son dirigidos por el hombre; también se pueden clasificar como discretos o continuos, dependiendo del comportamiento de los cambios que en él se dan con respecto al tiempo y al estado del sistema, cuantificado en las variables de estado.

Más en detalle, en una simulación por eventos discretos (SED) el reloj de la simulación no se actualiza constantemente, sólo lo hace cuando cambia el estado del sistema, es decir, cuando ocurre un nuevo evento, tal como se muestra en la figura 1, donde el reloj arranca en 0 al comienzo de la simulación, para pasar a t_1 , y luego a t_2 y así sucesivamente; mientras que la simulación continúa implica una actualización constante del reloj, por ejemplo, cada segundo, minuto, etc. En la figura 2 se muestra el diagrama de actualización constante del reloj de una simulación continua.

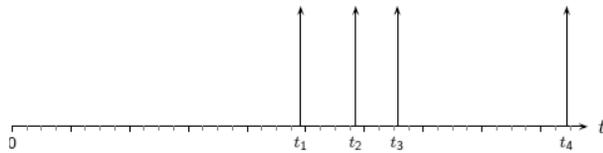


Figura 1. Avance del reloj de la simulación en una SED

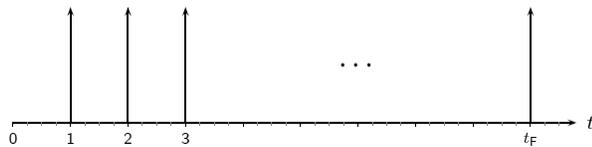


Figura 2. Avance del reloj en una simulación continua

Teniendo en mente la figura 1, hay dos formas diferentes para actualizar el estado del sistema en el tiempo durante la simulación: una se conoce como *fixed time-step model*: un temporizador o cronómetro se simula y todos los eventos que ocurran en este periodo se tratan como simultáneos; en la segunda, denominada *event-to-event*, el tiempo avanza hasta que ocurre el próximo evento, y el estado del sistema no cambia entre eventos. Los diagramas de flujo para ambos métodos de simulación en su forma más general se muestran en la figura 3.

1.2 Beneficios de la simulación

Al analizar un sistema mediante un modelo de simulación, se obtienen diferentes beneficios (figura 3, tomada de Deo, 2004, p. 41), entre ellos:

- Deducir las implicaciones lógicas por medio de la interpretación de los conocimientos teóricos y empíricos que tiene el investigador.
- Promover la adecuada comprensión del sistema.
- Manipular con facilidad el sistema.
- Controlar fácilmente la variación de los recursos.
- Ser más económico que los estudios directos del sistema.

1.3 Componentes de un sistema

Desde el punto de vista de la modelación y simulación, los sistemas tienen estos componentes:

- *Estado*. Situación del sistema en un momento determinado. Dicha situación se describe con una colección de *variables de estado*.
- *Variables de decisión*. Variables modificables por el administrador o analista del sistema.
- *Parámetro del sistema*. Constantes físicas, valores de diseño, constantes de proporcionalidad, entre otras, presentes en el sistema.
- *Criterios de desempeño*. Variables definidas para evaluar el desempeño del sistema.
- *Política de operación*. Cada una de las combinaciones de valores particulares asignados a las variables de decisión por el administrador o analista del sistema. En otras palabras, una política de operación se puede entender como una configuración del sistema, donde la idea principal de la simulación es evaluar diferentes configuraciones mediante los criterios de desempeño definidos.

2. ANTECEDENTES

Colombia necesita iniciativas que contribuyan al desarrollo tecnológico, social, cultural e industrial, en cuanto a la gestión integral de residuos de envases de productos y su aprovechamiento. De Medellín llegan al relleno sanitario unas 1.500 t diarias de residuos sólidos, pero la ciudad genera 1.750 t; es decir, de las 1.750 toneladas que se generan al día, apenas se reciclan 250 t, equivalentes al 14% (Concejo de Medellín, 2007).

En los últimos años, la cantidad de desechos en toneladas de Tetra Pak que se han generado en Colombia vienen en gran crecimiento, según lo ilustra la figura 4. Sin embargo, de los desperdicios generados en Medellín, que ascienden a

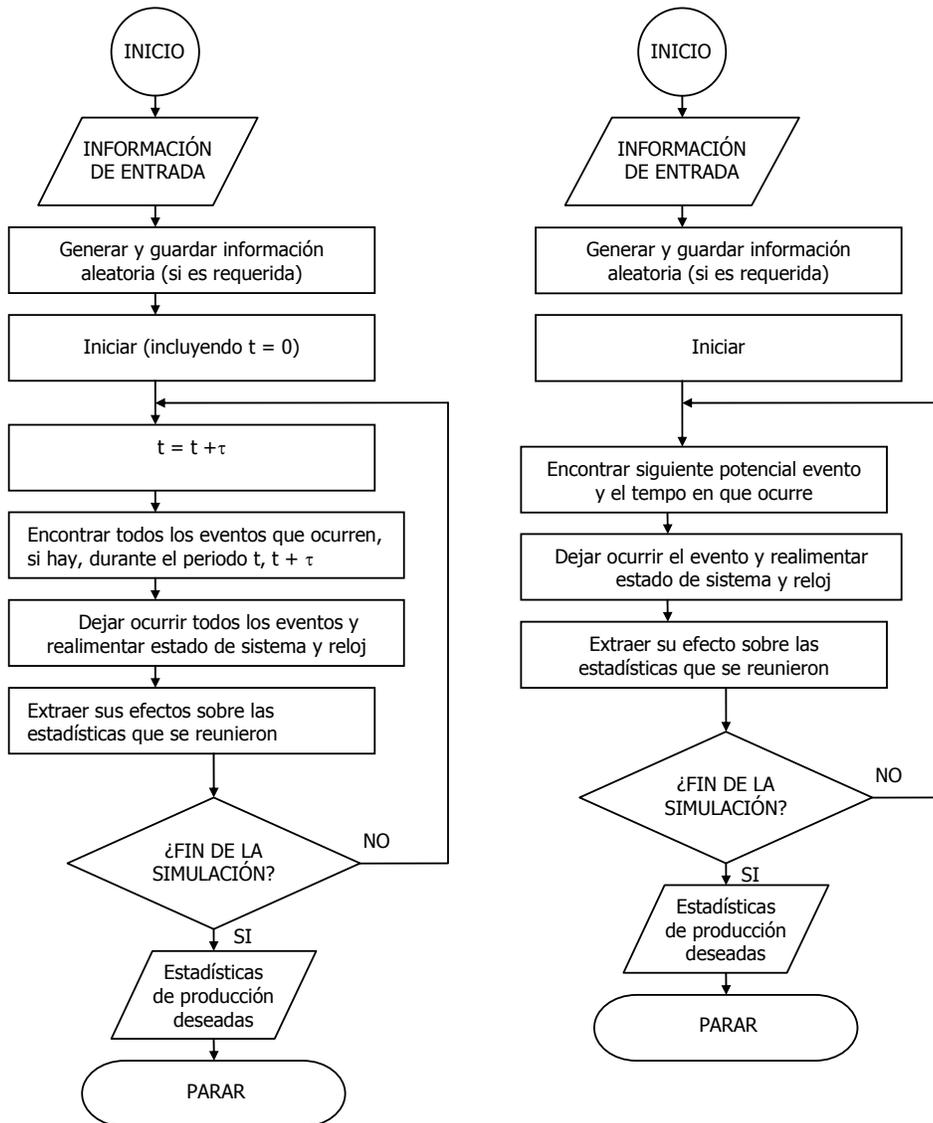


Figura 3. Diagrama de flujo para simulación de sistemas discretos

1.085 t/mes, sólo se recuperan 280 t/mes; esa recuperación la hacen ante todo dos compañías: Corficol S.A., ubicada en el Valle del Cauca y que únicamente recupera la pulpa de papel, y Ecoplak, en Bogotá, que produce tableros aglomerados a partir de los desechos. Teniendo esto en cuenta, queda en los rellenos sanitarios más de 3/4 de los desechos que se producen al mes.

La idea de negocio analizada por medio de SED pretende atender la necesidad social, ambiental y cultural de gestionar de manera integral los residuos de envases Tetra Pak y su aprovechamiento, recuperando la pulpa de papel y el polietileno y aluminio, para su posterior transformación en otros procesos de la industria.

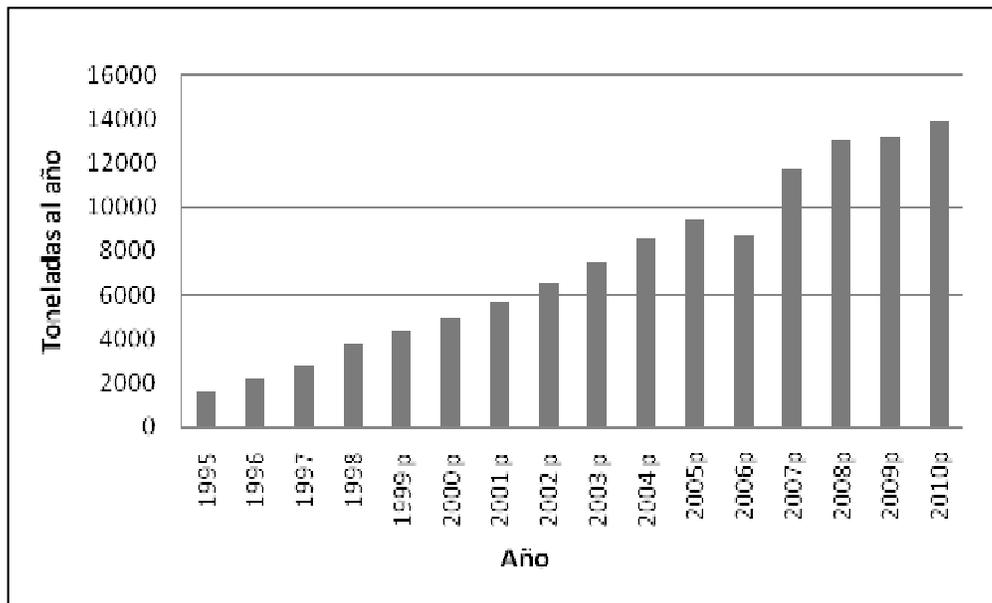


Figura 4. Generación de Tetra Pak por año

p = proyectado

Fuente: Departamento Mercadeo, Tetra Pak Ltda. Colombia.

En el reciclaje de Tetra Pak, países como Alemania, España y Brasil son pioneros y han tenido experiencia de éxito; hoy en día recuperan hasta el 80% de los desechos que generan. Para lograrlo, han desarrollado múltiples procesos, que van desde la recuperación de la pulpa y la producción de tableros aglomerados hasta la comercialización de pulpa, polietileno y aluminio, como es el caso brasileño, en el que se logra la separación de los tres componentes. Es importante resaltar que el éxito de estos países en la gestión de sus residuos está muy relacionado con el apoyo de la comunidad, que está comprometida y reconoce la importancia de reciclar, situación que no es muy frecuente en el caso colombiano. Además, tienen gran apoyo por aporte de las instituciones de educación y centros de investigación, pues incluso cuentan con varias patentes registradas en Europa relacionadas con el tema; también cuentan con la maquinaria necesaria para lograr la separación de los componentes.

3. OFERTA DE MATERIA PRIMA

La importancia del reciclaje y la necesidad de implementarlo como parte de la cultura de las personas ha generado una serie de retos, en especial en cuanto a la necesidad de desarrollar estrategias que permitan la recuperación de diversos materiales. Sobre todo, han surgido grandes interrogantes que se refieren al nivel de cultura, el impacto, la importancia y la participación de las personas de Medellín en temas relacionados con el reciclaje, por ejemplo, la separación de los residuos, el interés por productos reciclables y sus expectativas de uso.

De acuerdo con esto, se realizó una encuesta a 60 familias de cada uno de los seis estratos de la ciudad, con el fin de recolectar la información más relevante en cuanto a las costumbres de reciclaje y separación de las basuras, si se incluye el Tetra Pak entre los residuos recuperables o no, la satisfacción con el envase y la conducta que se seguiría, si el Tetra

Pak se pudiera reciclar. En la tabla 1 se incluyen: las proporciones muestrales de familias que no separan residuos; las familias que incrementarían el consumo de productos envasados en Tetra Pak si fuera reciclable, tanto las que no separan desechos como las que sí lo hacen. La tabla 1 incluye los respectivos intervalos de confianza para las proporciones poblacionales por estrato.

La población actual de la ciudad de Medellín se estima en 2.042.093 habitantes para 2008 (ALL-BIZ, 2005-2008), dividida en 6 estratos socioeconómicos, siendo el estrato 1 el que menores ingresos percibe. En la tabla 2 se presenta la composición socioeconómica de Medellín, según datos del 2006 (Antioquia, 2006); en especial, se está considerando el patrón de consumo que sigue la población de la ciudad en cuanto al consumo de bebidas envasadas en Tetra Pak (tabla 3).

Tabla 1. Proporción de familias que separan residuos y que consumirían más Tetra Pak si fuera reciclable

No separan los residuos, por estrato						
Estrato	1	2	3	4	5	6
Proporción	0,4833	0,4167	0,3333	0,2333	0,25	0,25
No separan desechos y aumentarían el consumo de Tetra Pak si fuera reciclable						
Estrato	1	2	3	4	5	6
Proporción	0,3793	0,6	0,3	0,7857	0,5333	0,4
Separan desechos y aumentarían el consumo de Tetra Pak si fuera reciclable						
Incluir el Tetra Pak	1	2	3	4	5	6
Probabilidad	0,4194	0,4	0,625	0,5	0,6	0,4444

Tabla 2. Composición socioeconómica en Medellín

Estrato	Viviendas por estrato	Proporción
1	57,102	10,11%
2	192,848	34,13%
3	177,400	31,40%
4	64,214	11,37%
5	49,977	8,85%
6	23,449	4,15%
Total	564,990	100%



Tabla 3. Distribución consumo de Tetra Pak mensual según estrato en Medellín

	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6
Distribución	Log logística (min=3, forma=2,11, escala=32.4)	Weibull (min=13, forma=0,789, escala=49,1)	Exponencial (min=1, escala=86,1)	Log normal (min=17, $\mu=4,36$, $\sigma=1,21$)	Gamma (min=5, forma=0,714, escala=125)	Weibull (min=4, forma=0,765, escala=97,4)
Valor-p (prueba Kolmogorov-Smirnov)	0,737	0,670	0,942	0,824	0,784	0,877

3.1 Modelo de oferta de materia prima

Según el patrón de consumo, su comportamiento, satisfacción y, en general, características de consumo, se construye un modelo en Extend que simula el funcionamiento para 2.042.093 habitantes, calculando el nivel de desechos de Tetra Pak que se generan en Medellín.

- *Sistema.* Comportamiento de la población de Medellín, en cuanto al consumo y reciclaje de Tetra Pak.
- *Variables de decisión.* Ninguna, el comportamiento de consumo y postconsumo mostrados en el modelo sólo dependen de variables exógenas (parámetros del sistema).
- *Parámetros del sistema.*
 - Peso (en gramos) del envase pequeño: 8,5 g.
 - Peso (en gramos) del envase grande: 28 g.
 - Distribución del consumo mensual por estrato: ver tabla 3.
 - Probabilidad de no reciclar según estrato: ver tabla 1.
 - Probabilidad de reciclar Tetra Pak, dado que actualmente no recicla, según estrato: ver tabla 1.
 - Probabilidad de incrementar reciclaje de Tetra Pak, dado que actualmente recicla, según estrato: ver tabla 1.
- *Criterio de desempeño.* Total de desechos (en kilogramos) disponibles mensualmente en Medellín.

Política de operación. Ninguna, ya que no existen variables de decisión. Es un modelo exógeno, pues depende de la dinámica del mercado, que no es controlable.

La configuración de la simulación se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Configuración de la simulación del modelo de oferta de materia prima

Especificación	Valor
Unidad de tiempo	Año
Inicio	0
Fin	1
Número de corridas	1.000

3.2 Modelo del proceso productivo

Luego de conocer la cantidad de desechos de Tetra Pak que se generan en la ciudad de Medellín, se simuló el modelo del proceso productivo necesario para transformarlos en materia prima de nuevos productos. El diagrama del proceso de reciclaje se muestra en la figura 5, en la cual se supone un precio fluctuante entre \$180 y \$240 por kg diariamente para el año 2008 (según experiencias de los autores). Debe tenerse en cuenta que procesar más de 4 t en un día genera sobrecostos en la mano de obra; además, el proceso de hidropulpado tarda 2 h/t, el prensado tarda entre 5 y 10 minutos (se supone distribución uniforme).

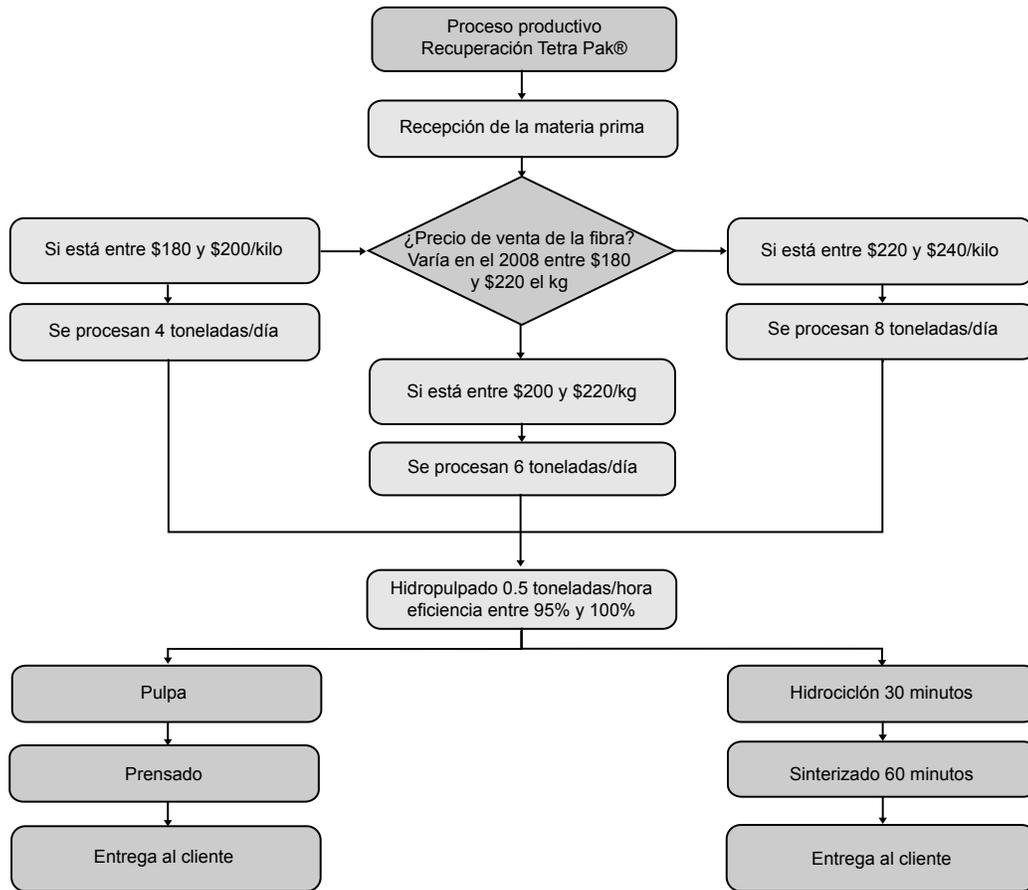


Figura 5. Diagrama de flujo proceso productivo

El modelo tiene las siguientes características:

- *Sistema*
 - Proceso productivo para la recuperación parcial de Tetra Pak.
- *Variables de decisión*
 - Precio de compra de la materia prima (\$/kg)
 - Capacidad de producción.
- *Parámetros del sistema*
 - Porcentaje de pulpa y de compuesto luego de hidropulpado: 75% pulpa y 25% compuesto
 - Eficiencia del proceso de prensado (pulpa). Real uniforme entre el 95% y el 100%.
- Eficiencia del proceso hidrociclón y sinterizado (compuesto). Real uniforme entre el 95% y el 100%
- Precio de venta de la pulpa (\$/kg): Real uniforme \$180 y \$240/kg.
Precio de venta del compuesto (\$1000/kg.)
- *Criterios de desempeño*
 - Ingresos por venta de fibra proveniente del Tetra Pak
 - Ingresos por venta de compuestos provenientes del Tetra Pak
 - Costos totalmente variables del proceso productivo



• *Política de operación*

- Precio de compra de la materia prima: \$80/kg
Capacidad de producción: 4 t (capacidad hidropulper)
- Precio de compra de la materia prima: \$90/kg
Capacidad de producción: 4 t (capacidad hidropulper)
- Precio de compra de la materia prima: \$90/kg
Capacidad de producción: 5 t (capacidad hidropulper)
- Precio de compra de la materia prima: \$80/kg
Capacidad de producción: 5 t (capacidad hidropulper)
- Precio de compra de la materia prima: \$85/kg
Capacidad de producción: 4,5 t (capacidad hidropulper)

La configuración de la simulación se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Configuración de la simulación del modelo del proceso productivo

Especificación	Valor
Unidad de tiempo	Horas
Inicio	0
Fin	8
Número de corridas	1.000

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el caso de la oferta de materia prima, las distribuciones de los kg/año de materia prima separada y no separada se muestran en la tabla 6. Además, se calcularon los respectivos intervalos de confianza del 95% para la media, mostrados en la tabla 7.

Estos intervalos de confianza se pueden confrontar con las proyecciones de ventas para Colombia del productor del envase “Tetra Pak-Colombia”, que se presentan en la tabla 8.

Tabla 6. Distribución para los resultados del modelo de oferta de materia prima en Medellín

kg de Tetra Pak que son separados entre los residuos reciclables	Lognormal (min=6,57e+0,004, $\mu=13,4$, $\sigma=7,46e-0,003$)
kg de Tetra Pak que no son separados entre los residuos reciclables	Weibull (min=6,91e + 0,005, forma=2,53, $\beta=1,09e + 0,004$)

Tabla 7. Intervalo de confianza para los resultados del modelo de oferta de materia prima en Medellín

	Límite inferior	Límite superior
kg de Tetra Pak que son separados entre los residuos reciclables	739974,2604 kg	759959,9917 kg
kg de Tetra Pak que no son separados entre los residuos reciclables	691185,0732 kg	709381,908 kg

Tabla 8. Proyección de ventas de la empresa Tetra Pak Ltda. Colombia

AÑO	Toneladas/año	Toneladas/mes
1995	1647	137
1996	2223	185
1997	2890	241
1998	3757	313
1999 p	4320	360
2000 p	4968	414
2001 p	5712	476
2002 p	6540	545
2003 p	7488	624
2004 p	8580	715
2005p	9516	793
2006p	8698	725
2007p	11724	977
2008p	13020	1085
2009p	13140	1095
2010p	13920	1160

p = proyectado
Fuente Departamento Mercadeo

En cuanto al proceso productivo, la política de operación con máximos ingresos y mínimos costos totalmente variables (Goldratt y Cox, 1999) fue al trabajar con precio de compra de \$80/kg y producción de 4 t/h. Se calcularon los intervalos de confianza del 95% de ambos criterios de desempeño (tabla 9); adicionalmente, los ingresos por ventas de fibra y compuestos siguen distribuciones Johnson SB y Weibull, respectivamente, cuyos parámetros se muestran en la tabla 10.

Tabla 9. Intervalo de confianza para los resultados del modelo del proceso productivo, para la recuperación parcial de Tetra Pak

Variable	Límite inferior	Límite superior
Costo de la materia prima (diario)	\$320.000	\$640.000
Ingresos por venta de fibra (diario)	\$397.218	\$524.389
Ingresos por venta de compuesto (diario)	\$718.776	\$743.441

Tabla 10. Distribución para los ingresos del proceso productivo de recuperación parcial de Tetra Pak

Ingresos por venta de fibra (diario)	Johnson SB ($X_i=387$, $\lambda=149$, $\gamma=-4,53e-0003$, $\Delta=0,712$)
Ingresos por venta de compuesto (diario)	Weibull (min=714, forma=3,02, $\beta=19,2$)

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Las técnicas como la simulación de modelos estocásticos son una excelente fuente de información cuando se parte de un panorama incierto, como es el caso del reciclaje y procesamiento de materiales como el Tetra Pak, cuya información disponible es poca y no es aplicable para Medellín ni para Colombia, donde la experiencia ha mostrado un patrón de rechazo y poca participación en temas relacionados con el reciclaje y la separación en la fuente por parte de la población.

En cuanto a la idea de negocio planteada en este artículo, la mejor política de operación muestra viabilidad operativa, ya que los ingresos medios provenientes de la venta de fibra y compuestos superan los costos totalmente variables del proceso productivo; no obstante, a pesar del alto *throughput* (ingresos-costo totalmente variable) diario mostrado en los resultados, se debe tener en cuenta que faltan por incluir otros costos indirectos y gastos, además de la inversión inicial que debería realizarse para el montaje de una planta eficiente.



Queda, entonces, pendiente, a partir de estos resultados, desarrollar todo el plan de negocios que establezca la viabilidad financiera de un proyecto cuyo mercado apenas se está comenzando a explotar.

REFERENCIAS

Antioquia. Departamento Administrativo de Planeación (2004). Anuario Estadístico de Antioquia. Servicios Públicos. [Consultado 2 octubre 2008]. Disponible en: <http://planeacion.antioquia.gov.co/anuario2004/anuario2004/servicios/i-servicios.htm>.

ALL-BIZ. (2005-2008). [Consultado 17 septiembre 2008]. Disponible en <http://www.co.all-biz.info/guide/cities/?id=71>

Deo, Narsingh (2004). *System simulation with digital computer*. India: Prentice Hall of India.

Funk & Wagnall. (1992). *Standard college dictionary*.

Goldratt, Eliyahu M. y Cox, Jeff (1999). *La meta*. North River. 337 p.

Pooch, Udo W. and Wall, James A. (1992). *Discrete event simulation: a practical approach* (p. 2). CRC Press.

Medellín. Concejo Municipal. Acta 563 de sesión ordinaria. 3 de marzo de 2007. www.concejodemedellin.gov.co/webcon/concejo/concejo...1803.doc