

## **Artículo de Revisión**

# ***PROCEDIMIENTO PARA MODELAR PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PAPEL ONDULADO DESDE DATOS DE CONTROL EN FÁBRICA***

## ***PROCEDURE FOR MODELING CORRUGATED PAPER PRODUCTION PROCESSES FROM FACTORY CONTROL DATA***

Lirianet Fuentes Ramírez<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0009-0001-2318-5920>

Erenio González Suárez<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

Juan Francisco Puertas Hernández<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5642-5508>

Fernando Ramos Miranda<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0601-6228>

Agustín García Rodríguez<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8897-0671>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de La Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Abril 13, 2026; Revisado: Mayo 17, 2026; Aceptado: Junio 19, 2026

## **RESUMEN**

### **Introducción:**

La industria papelera enfrenta desafíos de eficiencia, calidad y costo, agravados por cambios en materias primas y tecnologías. En Cuba, plantas con tecnologías obsoletas requieren maximizar su productividad mediante métodos científicos.

### **Objetivo:**

Establecer un procedimiento para la modelación matemática y optimización técnico-económica de procesos de fabricación de papeles industriales, aplicable a diferentes instalaciones y productos.

### **Materiales y Métodos:**

Se propone un proceso global descompuesto en etapas y elementos. Cada etapa se modela mediante regresión múltiple o modelos de mezclas (Scheffé) utilizando datos industriales a través de planes experimentales. La optimización se realiza en dos



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Lirianet Fuentes, Email: [lframirez@uclv.edu.cu](mailto:lframirez@uclv.edu.cu)



niveles: se optimizaron las variables de operación con el Método Simplex, y la proporción de mezcla con la técnica de Fibonacci. Se utiliza la prueba F de Fisher para todas las etapas y una optimización global para bagazo fresco y almacenado, con una validación estadística del modelo a partir del análisis de varianza (ANOVA).

### **Resultados y Discusión:**

Se obtiene un procedimiento que permite simular el efecto de cambios operativos sobre la calidad y el costo. La optimización a dos niveles demostró que es factible y económicamente ventajoso operar con una mezcla que contiene hasta un 65 % de pasta de papel reciclado y un 35 % de pulpa virgen de bagazo, superando los límites empíricos previos.

### **Conclusiones:**

La síntesis por etapas y la agregación matricial facilitan la obtención de un modelo global del proceso. La optimización a dos niveles proporciona una herramienta práctica para tomar decisiones, mejorando la eficiencia en plantas papeleras con recursos limitados.

**Palabras clave:** agregación de modelos; bagazo; diseño experimental; industria papelera; modelación matemática; optimización.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

The paper industry faces challenges of efficiency, quality, and cost, exacerbated by changes in raw materials and technologies. In Cuba, plants with outdated technologies require maximizing productivity through scientific methods.

### **Objective:**

To establish a procedure for the mathematical modeling and techno-economic optimization of industrial paper manufacturing processes, applicable to different facilities and products.

### **Materials and Methods:**

A global process decomposed into stages and elements is proposed. Each stage is modeled using multiple regression or mixture models (Scheffé) with industrial data through experimental designs. Optimization is carried out in two levels: operating variables were optimized using the Simplex method, and the mixture proportion was optimized using the Fibonacci technique. Fisher's F-test is used for all stages, and a global optimization for fresh and stored bagasse is performed, with statistical validation of the model based on analysis of variance (ANOVA).

### **Results and Discussion:**

A procedure is obtained that allows simulating the effect of operational changes on quality and cost. The two-level optimization demonstrated that it is feasible and economically advantageous to operate with a mixture containing up to 65% recycled paper pulp and 35% virgin bagasse pulp, surpassing previous empirical limits.

### **Conclusions:**

Stage-wise synthesis and matrix aggregation facilitate obtaining a global model of the process. Two-level optimization provides a practical decision-making tool, improving efficiency in paper mills with limited resources.

---

**Keywords:** model aggregation; bagasse; experimental desing; paper industry; mathematical modeling; optimization.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde su invención, el papel ha sido un pilar fundamental para la educación, la comunicación y la higiene. Su cadena de producción es compleja, abarcando desde la recolección de la materia prima hasta la obtención de productos tan diversos como cartón o papel de alta calidad. A pesar de sus fluctuaciones en el mercado, la industria del papel continúa siendo un sector de primer orden. En 2025, el mercado mundial de productos de papel fue valorado en 351 mil millones de dólares, con una proyección de crecimiento hasta los 416 mil millones para 2035. En la actualidad, la industria papelera mundial se enfrenta a una triple presión: la escasez de capital, la volatilidad en el suministro de materias primas y la creciente exigencia de minimizar su impacto ambiental, el cual es considerable de aproximadamente el 6 % del consumo mundial de energía eléctrica y contribuye con cerca del 2 % de las emisiones industriales directas de CO<sub>2</sub> (IEA, 2023). Esto ha impulsado la búsqueda de soluciones prácticas que permitan no solo aumentar la productividad, sino también optimizar el uso de recursos y reducir los residuos.

En este contexto global, el uso de papel reciclado como materia prima ha cobrado una importancia capital. En este contexto, el principio de economía circular ha ganado una relevancia central para la industria de la pulpa y el papel. Este enfoque es fundamental para el sector, ya que la utilización de papel reciclado permite importantes ahorros de energía y agua y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el uso de fibras vírgenes. A nivel mundial, la tasa media de reciclaje de papel se sitúa en torno al 58 %, con Europa a la cabeza (75,1 % en 2024) (European Commission, 2023). Muchas fábricas dependen casi completamente del papel de desecho, cuyo procesamiento implica técnicas más suaves que las utilizadas para la fibra virgen (Teschke & Demers, 2001, Mofokeng et al., 2024).

La transición hacia la sostenibilidad en la industria papelera no solo está impulsada por la necesidad de eficiencia, sino también por un marco cada vez más exigente de políticas internacionales. En la Unión Europea, el Pacto Verde Europeo (European Green Deal) y su Plan de Acción de Economía Circular son los principales impulsores, con objetivos ambiciosos como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % para 2030 y alcanzar la neutralidad climática en 2050 (Muñoz et al., 2026).

Cuba no es ajena a esta realidad. La industria papelera nacional, con tecnologías que en muchos casos datan de mediados del siglo XX, ha debido adaptarse al procesamiento de nuevas materias primas, como el bagazo de caña y las fibras recicladas. Esta obsolescencia tecnológica y la necesidad de ser competitivos en calidad y costo hacen imperativo maximizar la eficiencia de los procesos productivos existentes.

En Cuba, destacan los trabajos pioneros de González (1982) en la optimización de la producción de papel para ondular, en procesos con reacción química para pulpas blancas, y en la modelación global de procesos papeleros. Estas investigaciones sientan las bases para el uso de diseños experimentales, análisis de regresión y técnicas de

---

simulación para mejorar la comprensión y el control de los procesos industriales (Hu et al., 2021; Plastics Today, 2025).

Sin embargo, es de notar como problema internacional la carencia de un procedimiento global y sistematizado que integre el conocimiento de las diferentes etapas del proceso y que permita, de manera práctica, definir los valores de las variables de operación y la proporción óptima de mezclas de pastas para garantizar la calidad del producto final al mínimo costo posible.

Por lo tanto, la presente investigación, en su fase conceptual y metodológica, tiene como objetivo establecer un procedimiento para la modelación matemática y optimización técnico-económica de procesos de fabricación de papeles industriales, aplicable a diferentes instalaciones y productos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Síntesis del proceso tecnológico

El primer paso consiste en descomponer el proceso global de fabricación de papeles industriales en unidades más manejables: etapas y elementos. Para el caso de estudio, se propone un diagrama con las variables y las operaciones unitarias clave. En este sentido, trabajos recientes han destacado la importancia de considerar la economía circular y el aprovechamiento de subproductos como estrategia para mejorar la sostenibilidad del proceso (Muñoz et al., 2026). En la figura 1 se muestra el diagrama del proceso con la estrategia de modelación.

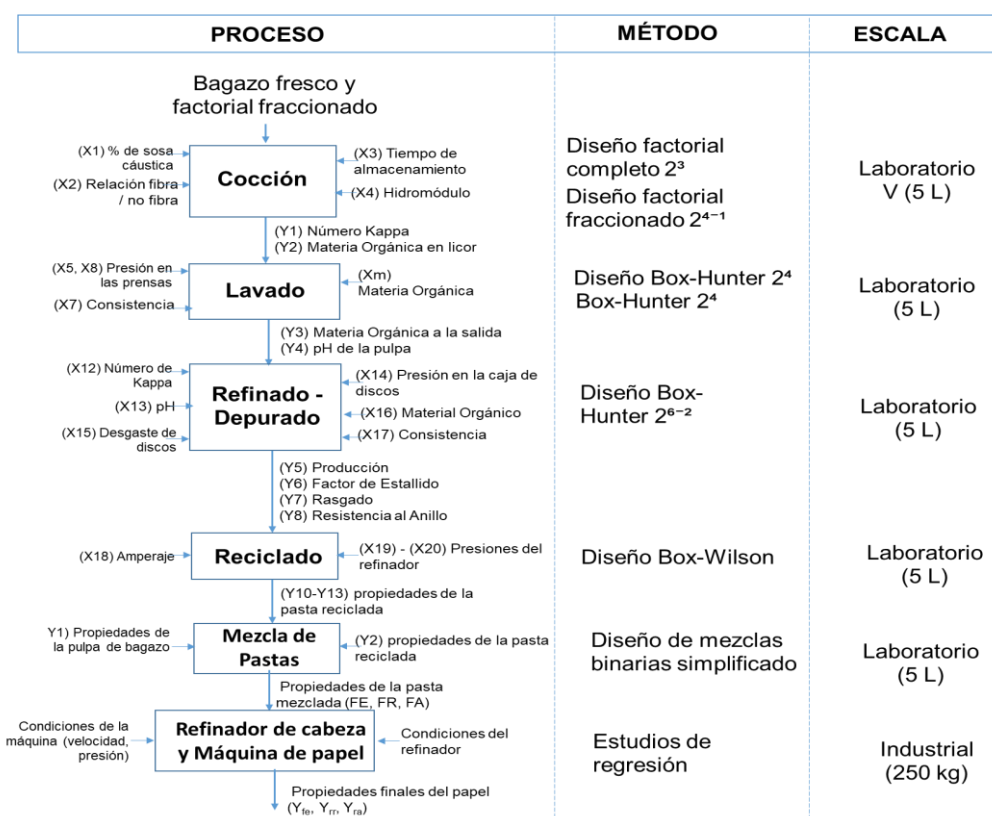


Figura 1. Diagrama de la estrategia de modelación

## **2.2 Aseguramiento de la calidad de los datos**

Antes de la modelación, es crucial garantizar la representatividad y confiabilidad de los datos (provenientes del control operativo o de experimentos planificados). Esto implica:

- Criterios de muestreo: Determinar el tamaño de muestra estadísticamente significativo para cada variable, utilizando métodos como el muestreo aleatorio simple y cálculos basados en la variabilidad de los datos.
- Reproductividad: Verificar que los datos no presentan sesgos significativos debidos a los analistas o a las condiciones de medición, empleando análisis de varianza (ANOVA) con modelos de clasificación doble. Se usa el método de clasificación doble con repeticiones por celda.
- Caracterización y control de variables: Utilizar técnicas multivariadas como el Análisis de Componentes Principales para identificar las variables de entrada más influyentes en cada elemento y reducir la dimensionalidad del problema, asegurando que los modelos se centren en los factores clave.

El análisis estadístico está basado en la norma UNE-ISO 13528 (2022), UNE-ISO 3534-1 (2013), para definir, medir y controlar la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones del proceso, el cual es el primer y más importante paso para blindar la reproductividad global del modelo. Estos conceptos son fundamentales para el aseguramiento de la calidad de los datos.

## **2.3 Modelación estadística de elementos y etapas**

Para cada elemento o etapa identificada, se construye un modelo matemático que relaciona las variables de entrada ( $X_i$ ) con las variables de salida o respuesta ( $Y_i$ ). Esto se logra mediante:

- Análisis de Regresión Múltiple: Ajuste de ecuaciones lineales o no lineales a los datos experimentales u operativos, siguiendo la forma matricial  $Y = X\beta + \varepsilon$ .
- Validación del modelo: Se realiza un análisis de residuos para detectar puntos anómalos y verificar las hipótesis de normalidad y homocedasticidad. La prueba F de Fisher se utiliza para evaluar la adecuación del modelo (comparando la varianza explicada con la varianza no explicada). Se diagnostica y trata la posible multicolinealidad entre variables independientes. Como guía para la implantación del control estadístico de procesos se encuentra la norma ISO 11462, (2001).
- Modelo de Mezclas: Para la etapa de mezcla de pastas, se propone el uso del diseño de Enrejado Simple para mezclas ternarias, cuyo comportamiento se modela mediante un polinomio de segundo grado. Este se puede reducir a un modelo binario cuando uno de los componentes no está presente. Investigaciones actuales han demostrado la efectividad de estos modelos para predecir propiedades mecánicas en productos con fibra reciclada (Muñoz et al., 2026).

Se ha seleccionado el método de Enrejado Simple para facilitar el trabajo experimental. Los requerimientos para el mismo son que las pruebas se efectúan a 6 puntos de composición del enrejado. Para la mayoría de las propiedades, una medida a cada punto del enrejado es suficiente, pero es importante que se realicen algunas réplicas a un punto que se sitúa convenientemente en cualquier zona del enrejado, con el fin de lograr un

---

cálculo del error experimental, o sea, el error al mezclar, al probar, etc., que es posible en cualquier parte del análisis.

#### 2.4 Agregación de modelos para un sistema global

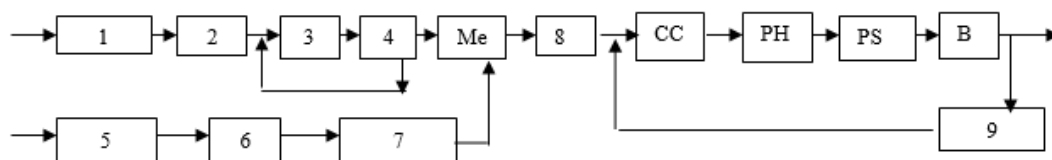
Una vez validados los modelos de cada elemento, se procede a su integración para obtener un modelo matemático del proceso global. Utilizando un enfoque matricial, el sistema se representa mediante ecuaciones donde las salidas de un elemento se convierten en entradas del siguiente. La agregación se realiza de forma secuencial, respetando la topología del proceso (con o sin reciclos). Para el proceso de fabricación de papel, el modelo global (pf) se obtiene como una combinación de los modelos de la planta de pulpa (MPP), la línea de reciclado (HR), la etapa de mezcla y la máquina de papel (MP), resultando en una expresión compleja pero manejable algebraicamente.

La validación de los modelos globales se realizó mediante la comparación de las predicciones con un conjunto de 15-20 corridas experimentales independientes no utilizadas en el ajuste. Se tiene como modelo global del proceso tecnológico la expresión matricial que se muestra en la ecuación 1.

$$pf = MP * (PP * Xb) Mb + (1 - Xb) HRq + Xb (1 - Xb) Ipbr \quad (1)$$

#### 2.5 Síntesis del proceso tecnológico global de una instalación industrial productora de papeles industriales

En las condiciones de Cuba; productora de azúcar de caña, y con ello de disponibilidad de bagazo como subproducto industrial los procesos que han logrado exportaciones, han incluido el pulpeo del bagazo para garantizar la calidad de los productos (González, 1982) por lo que el proceso que se estudia incluye esta etapa de obtención de fibra corta de bagazo industrial, el cual se sintetiza en la figura 2, en un total de 14 elementos o etapas.



**Figura 2.** Síntesis de un proceso tecnológico de fabricación de papeles industriales con pulpeo de bagazo de caña de azúcar

Los elementos y etapas se describen como sigue para todos los estudios del proceso:

1. Cocción
2. Lavado
3. Refinación de pulpa de bagazo
4. Depurado Tamizado
5. Hidropulper
6. Depurado de papel reciclado
7. Refinado del papel reciclado
8. Refinador de la cabeza de la máquina de papel
- Me. Mezclado

CC. Caja de cabecera  
PH. Parte húmeda de la máquina de papel, Fourdrinier  
PS. Parte seca de la máquina de papel  
9. Hidropulper de tirillas y papeles rotos  
B. Bobinado del papel

En esta instalación industrial, considerando la importancia técnico - económica de la planta de pulpa, se siguió la estrategia de modelar en una primera etapa la operación de esta planta. En paralelo, con una fecha de culminación definida para garantizar la integración metodológica del proceso global, se procede a la modelación para todo el proceso tecnológico. Se crearon dos grupos de trabajo, uno encargado del análisis del proceso tecnológico global, donde se incluye tanto la planta de pulpa como el elemento de mezclado de las pastas papeleras.

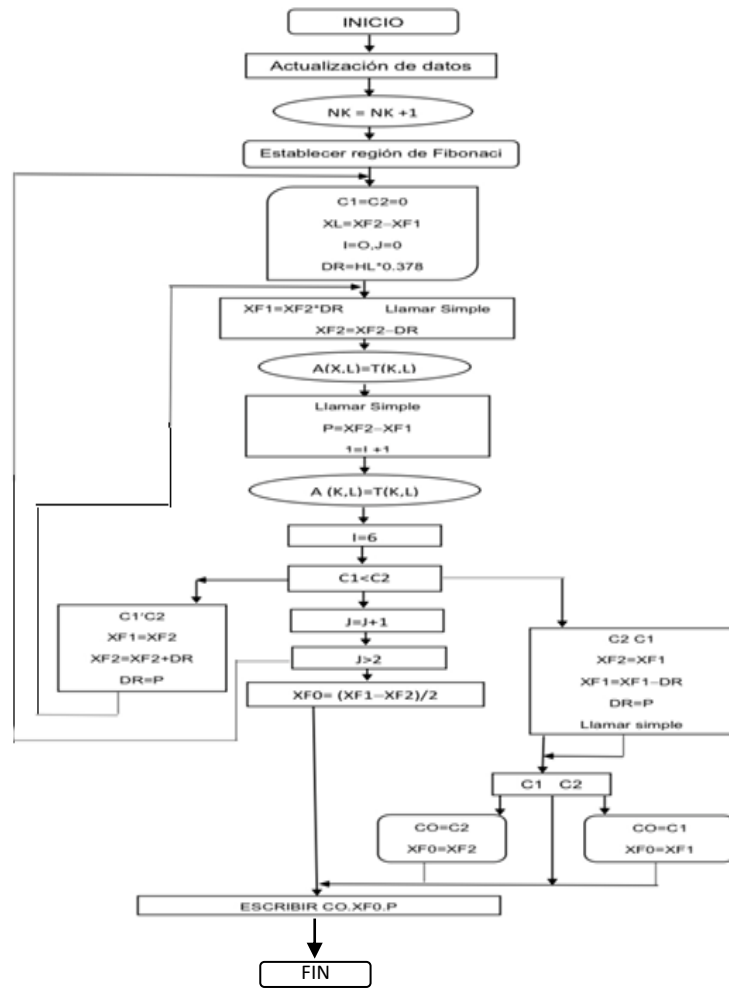
## **2.6 Estrategia de optimización a dos niveles**

El modelo global obtenido se utiliza para la optimización del proceso. Se propone una estrategia de dos niveles:

- Nivel 1 (Optimización interna): Para una proporción fija de mezcla de pastas ( $X_b$ ), se determinan los valores óptimos de las variables de operación continuas (presiones, temperaturas, flujos) que maximizan una función objetivo (por ejemplo, la ganancia económica). Esto se puede realizar con métodos como el Método Simplex para programación lineal, dado que los modelos de calidad son lineales en el rango experimental.
- Nivel 2 (Optimización externa): La proporción de mezcla ( $X_b$ ) se varía sistemáticamente (por ejemplo, mediante la técnica de búsqueda de Fibonacci) y para cada valor se ejecuta la optimización del Nivel 1. El óptimo global del sistema será la combinación de  $X_b$  y las variables de operación que reporten el mayor valor de la función objetivo, cumpliendo con todas las restricciones de calidad del producto final.
- La optimización se realiza al definir una función objetivo de ganancia (ingresos por venta del papel menos costos de materias primas y operación). Las restricciones son los límites de calidad exigidos para el cartoncillo para corrugar (valores mínimos de estallido, rasgado y anillo) y los rangos de variación de las variables de operación definidos en los experimentos.

En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques para la optimización en una tecnología de papeles industriales.

---



**Figura 3.** Diagrama de bloques para la optimización en una tecnología de papeles industriales

La estructura del modelo global y la naturaleza del problema de decisión, que implica seleccionar tanto la mezcla de pastas como las condiciones de operación, hacen que una estrategia de optimización a dos niveles sea la más adecuada. Para la optimización interna, donde los modelos de calidad son lineales en el rango experimental, se emplea el método simplex. Esta elección se fundamenta en la eficiencia computacional y la robustez del método para resolver problemas de programación lineal, muy extendido en la industria química y de procesos. Por su parte, para la optimización externa se utiliza la técnica de búsqueda de Fibonacci. Este método determinista es ideal para explorar de manera sistemática el intervalo de la variable de mezcla. La combinación de estos métodos clásicos asegura un procedimiento computacionalmente factible, incluso con recursos modestos, y proporciona soluciones deterministas que son un requisito fundamental para la implementación industrial. Aunque se reconoce el valor de las técnicas modernas de optimización, la simplicidad y eficacia de los métodos seleccionados se alinean con los objetivos del estudio y son aplicables en el contexto de plantas con recursos limitados.

Los métodos de búsqueda (Fibonacci) y de programación lineal (Simplex) son deterministas. Dada la misma entrada, siempre proporcionan la misma salida. Esto es una ventaja significativa frente a algoritmos metaheurísticos como los Algoritmos Genéticos, que, al ser estocásticos, pueden dar soluciones ligeramente diferentes en cada

ejecución, lo que no es deseable en un entorno industrial donde se requiere consistencia y predictibilidad.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el contexto específico de la industria de pulpa y papel, se identifican tres tipos de modelos como particularmente relevantes: los modelos fenomenológicos para etapas con reacción química (como la digestión del bagazo), los modelos de balances de población para describir el flujo y mezclado de determinados sistemas, donde los fenómenos de transporte no pueden ser planteados o son muy complejos y los modelos empírico-estadísticos para correlacionar variables operativas con parámetros de calidad del producto final. Estos últimos, basados en diseños experimentales (factoriales, de mezclas) y análisis de regresión, son los más accesibles y prácticos para su implementación en plantas existentes, donde se dispone de una gran cantidad de datos históricos (Kafarov, 1976). En la última década, la incorporación de técnicas avanzadas de análisis químico y la aplicación de ultrasonido han permitido mejorar la eficiencia en el reciclaje de aguas y fibras (Kosel et al., 2020).

El análisis del estado del arte revela que, a nivel mundial, las grandes empresas papeleras (WestRock, International Paper, Stora Enso, etc.) invierten continuamente en innovación tecnológica, incluyendo la automatización, el uso de software avanzado para el control de procesos y el desarrollo de productos más sostenibles.

Aquí se observa que la transformación digital bajo el concepto de Industria 4.0 está siendo adoptada por el sector, con casos de implementación de control predictivo que han logrado reducciones energéticas del 12 % y ahorros operativos superiores a los 5 millones de euros anuales. Se estima que las empresas líderes en sostenibilidad destinan entre el 8 y 12 % de su capital anual a proyectos de economía circular (Van, 2025). Esto subraya la necesidad de que las industrias nacionales adopten metodologías científicas para no quedar rezagadas y poder competir en un mercado globalizado. En el contexto cubano, existe una tradición de investigación aplicada en este campo, con resultados que demuestran la viabilidad de optimizar procesos con recursos limitados (González, 1982).

#### **3.1 Procedimiento de modelación propuesto**

El principal resultado es la formalización de un procedimiento sistemático y reproducible para la modelación y optimización de una planta de papeles industriales. Este procedimiento no es una receta rígida, sino una guía estructurada que integra los principios lógicos y heurísticos de la modelación. La elaboración de los modelos globales de los procesos tecnológicos se realiza de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Síntesis del proceso tecnológico en estudio, definiendo los elementos y etapas en los cuales se descompondrá el proceso tecnológico para su análisis.
  2. Elaboración de los modelos tecnológicos de los elementos en los cuales se ha descompuesto el proceso. Aquí se incluirán los resultados de los balances de materiales y energía, estudios cinéticos y el procesamiento de datos del control operativo del proceso, lo que requiere:
    - Estudio de la representatividad y variabilidad de los datos del proceso.
    - Caracterización de los factores que inciden en el proceso.
-

- Determinación del tamaño de la muestra estadística en cada elemento.
  - Elaboración del modelo tecnológico de los elementos del proceso, a través de la recopilación de datos estadísticos susceptibles de ser analizados, descartando los datos no confiables y respetando el tamaño de la muestra.
3. Construcción del modelo global del proceso tecnológico partiendo del modelo de los elementos y asumiendo la estrategia de agregación elaborada para cada caso con apoyo del método del cálculo matricial (González, 1982).
  4. Verificación de la calidad de los modelos globales mediante la comparación de los resultados del modelo con corridas experimentales ejecutadas al efecto y las pruebas estadísticas adecuadas.

La metodología de modelado y optimización propuesta se apoya en estándares internacionales reconocidos. Estos se ajustan a los principios establecidos en la UNE-ISO 3534-1 (2013) sobre vocabulario y símbolos estadísticos. Para la validación de los modelos mediante ANOVA y análisis de residuales se han seguido las directrices de la ISO 16337 (2021). El cumplimiento de estas normas asegura la reproducibilidad y validez internacional de los resultados obtenidos.

### **3.1.1 Síntesis y modelación por etapas**

El procedimiento propone una visión jerárquica del proceso, dividiéndolo en subsistemas con entradas y salidas claramente definidas. Para una planta típica que utiliza bagazo de caña y papel reciclado, se identifican tres grandes bloques interconectados:

1. Planta de pulpa virgen: Compuesta por las etapas de Cocción, Lavado y Refinado-Depurado. Se presentan modelos matriciales para cada una, donde las variables de respuesta de una etapa se convierten en variables de entrada para la siguiente.
2. Línea de preparación de pastas recicladas: Incluye el Hidropulper, Depurado y Refinado. Se modela de forma similar, con variables de operación propias.
3. Máquina de papel y mezclado: Esta sección integra las corrientes de pasta virgen y reciclada. La etapa de mezcla recibe un tratamiento especial mediante modelos de diseño de mezclas (Scheffé), que permiten capturar las interacciones no lineales entre los componentes fibrosos y predecir las propiedades de la pasta mezclada a partir de las propiedades individuales. La confiabilidad de los modelos de mezcla obtenidos no depende únicamente de la bondad de ajuste estadístico, sino también de una rigurosa validación experimental.

En este sentido, la metodología propuesta integra un proceso de verificación en dos niveles: la validación estadística y la validación experimental práctica, lo que garantiza que los modelos sean representativos de la realidad industrial y puedan ser utilizados con confianza en la optimización del proceso. Posteriormente, la pasta mezclada pasa por un refinador final y la máquina de papel, cuyo modelo relaciona las propiedades de la pasta de entrada con la calidad del producto final y la producción horaria.

---

### 3.2 Agregación como herramienta clave

La representación matricial de cada etapa facilita su agregación. El modelo global del proceso no es más que la composición (producto matricial) de los modelos de las etapas individuales, teniendo en cuenta los puntos de unión y mezcla. La ecuación resultante es ( $pf = MP * [a * (MPP * b) + (1 - a) * (HR * q) + \text{Término de Interacción}]$ ) un poderoso instrumento de análisis, ya que condensa en una sola expresión matemática el comportamiento de toda la fábrica. Esto permite simular el efecto de cambios en cualquier variable de operación (desde la dosificación de sosa en cocción hasta la presión en el refinador final) sobre la calidad y el costo del producto final.

Las ecuaciones del modelo global de las propiedades físicas de calidad del papel cuando se utiliza bagazo fresco serán las expresiones 2, 3 y 4.

$$Y_{ef} = 18,967 + a * (-0,4 + 0,457 * X_1 - 0,351 * X_4 - 0,061 * X_8) + (1 - a) * (3,706 - 0,0105 * X_{16} - 0,231 * X_{17} + 1,166 * X_{18}) \quad (2)$$

$$Y_{rr} = 71,528 + a * (4,36 + 2,103 * X_1 - 1,57 * X_4 - 0,128 * X_8) + (1 - a) * (28,76 + 0,11 * X_{16} + 3,77 * X_{17} + 4,61 * X_{18}) \quad (3)$$

$$Y_{ra} = 4,282 + a * (2,533 + 2,124 * X_1 - 1,638 * X_4 + 0,33 * X_8) + (1 - a) * (10,31 + 0,0017X_{16} + 0,195 * X_{17} + 2,356 * X_{18}) \quad (4)$$

### 3.3 Estrategia de optimización Bilevel

La estructura del modelo global y la naturaleza del problema de decisión (elegir tanto la mezcla como la operación) hacen que una estrategia de optimización a dos niveles sea la más adecuada. Este enfoque desacopla el problema:

- En el nivel inferior, para una mezcla dada (porcentaje de pasta virgen fijo), se resuelve un problema de programación (lineal en este caso) para maximizar la ganancia, sujeto a las restricciones de calidad impuestas por el mercado. Las variables de decisión son las operativas (presiones, flujos, etc.).
- En el nivel superior, se explora el espacio de la mezcla (la variable "a"). Para cada valor de "a", se llama al optimizador del nivel inferior y se registra la ganancia máxima alcanzable. La "a" que produce la mayor ganancia global es la mezcla óptima, y las variables de operación correspondientes son las condiciones óptimas de operación.

Este enfoque es metodológicamente sólido y computacionalmente factible, incluso con recursos modestos. La combinación de un método de búsqueda unidimensional (como Fibonacci) para la mezcla y un método de optimización lineal (Simplex) para las variables de operación proporciona una solución elegante y eficaz.

## 4. CONCLUSIONES

1. La complejidad de una planta de papeles industriales puede ser abordada mediante un procedimiento de síntesis que la descompone en etapas y elementos funcionales (Cocción, Lavado, Refinación, Mezcla, Máquina de papel). Esta

- desagregación facilita la modelación individual de cada parte, permitiendo el uso de la técnica estadística más adecuada para cada caso.
2. Este modelo global es una herramienta de simulación que relaciona las variables de entrada (materias primas y condiciones de operación) con las salidas del sistema (calidad del producto y producción).
  3. La estrategia de optimización a dos niveles, que integra de manera natural la naturaleza del problema, demostró que es factible y económicamente ventajoso operar con una mezcla que contiene hasta un 65 % de pasta de papel reciclado y un 35 % de pulpa virgen de bagazo, superando los límites empíricos previos para optimizar un indicador técnico-económico, como la rentabilidad, sin violar las restricciones de calidad del producto final.

## REFERENCIAS

- European Commission. (2023). *European Green Deal: Delivering on our targets* [Archivo PDF]. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869807/EGD\\_brochure\\_EN.pdf](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869807/EGD_brochure_EN.pdf)
- González, E. (1982). *Modelación y optimización del proceso de producción de papel para ondular* [Tesis de doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba].
- Hu, H., Zeng, J., Cheng, Z., Wang, X., Wang, B., Zeng, Z., & Chen, K. (2021). Cellulose nanofibrils (CNFs) produced by different mechanical methods to improve mechanical properties of recycled paper. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117474. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117474>
- IEA., (2023). Pulp and paper emissions intensity in the Net Zero Scenario, 2018-2030, IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/pulp-and-paper-emissions-intensity-in-the-net-zero-scenario-2018-2030-2>
- ISO 11462., (2001). Guidelines for implementation of statistical process control (SPC) - Part 1: Elements of SPC. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/33381.html>
- ISO 16337., (2021). Application of statistical and related methods to new technology and product development process - Robust tolerance design (RTD). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iso?c=073421>
- Kafarov, V. V. (1976). *Métodos Cibernéticos en la Química y la Industria Química*. Moscú: Editorial Mir.
- Kosel, J., Šuštaršič, M., Petkovšek, M., Zupanc, M., Sežun, M., & Dular, M. (2020). Application of (super)cavitation for the recycling of process waters in paper producing industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105002. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105002>
- Mofokeng, N. N., Madikizela, L. M., Tiggelman, I., & Chimuka, L. (2024). Chemical profiling of paper recycling grades using GC-MS and LC-MS: An exploration of contaminants and their possible sources. *Waste Management*, 189, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.014>
- Muñoz, L. V., Muñoz, V. M., & Cuate, D. H. (2026). Economía circular en el reciclaje de papel, obteniendo materiales de valor agregado. *Prisma ODS: Revista*
-

*Multidisciplinaria sobre Desarrollo Sostenible*, 5(1), 81-97.  
<https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i1.146>

Plastics Today. (26 de noviembre de 2025). *Machine Learning Cracks the Plastics Code*. <https://www.plasticstoday.com/industry-trends/machine-learning-cracks-the-plastics-code>

Teschke, K., & Demers, P. A. (2001). Industria de la pulpa y el papel. *En Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*.  
<https://www.insst.es/documents/94886/161971/Sumario+del+Volumen+III.pdf/657d0608-26d1-4ab6-9491-33a78383b1ac?t=1526457368117>

UNE-ISO 3534-1., (2013). Estadística. Vocabulario y símbolos. Parte 1: Términos estadísticos generales y términos empleados en el cálculo de probabilidades.  
<https://www.en.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=norma-une-iso-3534-1-2013-n0051704>

UNE-ISO 13528., (2022). Métodos estadísticos para su uso en pruebas de aptitud mediante comparación interlaboratorio.  
<https://www.iso.org/standard/78879.html#lifecycle>

Van, R. J. (2025). Advanced process control (APC) overview - How to find and justify opportunities. [Conference session], in *2025 IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference (PPIC)*, 143-156. <https://doi.org/10.1109/PPIC62819.2025.11433712>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- M.Sc. Lirianet Fuentes Ramírez. Investigación, redacción - primera redacción.
  - Dr.Sc. Erenio González Suárez. Gestión de proyectos, redacción - revisión y edición, visualización.
  - Dr.C. Juan Francisco Puertas Hernández. Redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Fernando Ramos Miranda. Redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Agustín García Rodríguez. Análisis formal, supervisión.
-