

**Matrix model of the pulp preparation stage in the production of industrial papers**Sección Agroindustria  
Vol. 2026. ep04–1001Milena Bárbara Cornelio Vera<sup>1</sup>, Erenio González Suárez<sup>2</sup>| Recibido: 23/03/2026 |  
| Aceptado: 30/03/2026 |  
| Publicado: 09/04/2026 |<https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-v2026ep04-1001> **Resumen**

En el trabajo se plantea el objetivo de obtener un modelo matricial que caracterice la etapa de producción de pasta de papel reciclado que sea sucesible de emplearse en el modelo global del sistema tecnológico del procesos de fabricación de papel industrial. Mediante métodos estadísticos y de agregación se proponen su obtención y uso. Se valida el modelo obtenido de las experiencias realizadas industrialmente y finalmente se elaboran conclusiones y recomendaciones entre las que las resaltan la verificación de la adecuación del modelo y su factibilidad de utilización en la confección del modelo global agregado.

**Palabras clave**

pulpa, papel, papel reciclado, refinación

**Abstract**

The objective of the work is to obtain a matrix model that characterizes the production stage of recycled paper pulp that can be used in the global model of the technological system of the industrial paper manufacturing processes. Through statistical and aggregation methods, their obtaining and use are proposed. The model obtained from the experiences carried out industrially is validated and finally conclusions and recommendations are drawn up, among which the verification of the adequacy of the model and its feasibility of use in the preparation of the aggregate global model stand out.

**Keywords**

pulp, paper, recycled paper, refining

**Direcciones**<sup>1</sup>Empresa Papelera “Pulpa Cuba”. Las Villas, Cuba. Email: milenacornelio137@gmail.com<sup>2</sup>Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Las Villas, Cuba. Email: erenio@uclv.edu.cu**Autor para la correspondencia**

Erenio González Suárez. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Las Villas, Cuba. Email: erenio@uclv.edu.cu

**Cómo citar**CORNELIO VERA, Milena Bárbara, GONZÁLEZ SUÁREZ, Erenio and , 2026. Modelo matricial de la etapa de preparación de pastas en la producción de papeles industriales. PrePrint UEA. Vol. 2026. p. ep04–1001. <https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-v2026ep04-1001>**Editores Académicos**

Amaury Pérez Martínez

**Editorial**Editorial de la Universidad Estatal  
Amazónica 2026**Copyright**

Derechos de autor 2026 | PrePrint UEA.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

Los autores del artículo autorizan a la RACYT a que este artículo sea compartido bajo las condiciones de la Licencia Creative Commons 4.0 (CC-BY 4.0).

## 1. Introducción

Las ciencias modernas han desarrollado las ideas de la simulación, los métodos de análisis y las síntesis de los sistemas, por lo que la modelación matemática, se ha convertido en un problema cardinal de la Ciencia, pues ante ella están planteados tanto desde el punto de vista de las demandas de la practica, como desde el de la lógica interna de la evolución de la propia Ciencia, por lo que la aplicación de los métodos matemáticos de investigación al análisis y dirección de los procesos industriales son un problema de interés de la ciencia en su conjunto.

El fundamento de todo modelo, es el estudio del fenómeno, la experiencia, pues en la base de cualquier modelo, esta nuestra concepción acerca del contenido del fenómeno, la que se forma de la práctica.

La abstracción resultante del estudio de la experiencia práctica es lo que lleva a la concepción del modelo, a la generali-

zación teórica, cosa esta que facilita la matemática con su preciso aparato lógico. Como concepto de modelo matemático podemos aceptar que es una verdad relativa que refleja determinadas características de los fenómenos estudiados, aquí está presente el axioma de que en la modelación matemática de los procesos continuos “debe fijarse siempre la atención en el propósito fundamental para el cual se desarrollan los modelos, en lugar de dejarnos influir demasiado por la posible excelencia teórica de la presentación matemática de determinado modelo, por el hecho de que sea elegante” (William y Novack,1971), siendo una consigna importante en la modelación “ no utilizar una compleja técnica para resolver problemas que pueden ser resueltos por un análisis simple (Rudd-Watson,1980).

Con ello, cada vez tiene mayor importancia práctica, la obtención rápida y con gastos mínimos de modelos matemáticos que representen fielmente los procesos productivos de la industria de procesos para la optimización de las condiciones de operación y el empleo de las materias primas.

Por lo anterior, es de gran actualidad científica y de importancia para la aplicación de los métodos referidos a la estrategia de elaboración de modelos a través del procesamiento estadístico de la información que brinda el control operacional del propio proceso tecnológico, debido a que, como se sabe, los procesos tecnológicos no solo dan lugar a productos, sino también a información.

Por su complejidad, la investigación científica en la industria química requiere de herramientas apropiadas (Mamade et al, 2017) y en específico la tarea de elaborar el modelo matemático de un proceso, requiere del uso de modelos heurísticos, lo que para el caso de la industria química en general y en particular para procesos de la industria de pulpa y papel ha sido fundamentado de acuerdo con consideraciones científicas que se exigen en la formación doctoral (González et al, 2023).

## 2. Material y métodos

Todo proceso tecnológico de la industria química puede representarse como sistema (Kafarov,1976):

$$[C1][x1(1), x1(2), \dots, x1(k), \dots, x1(n)]^* + [B1]U = 0 \text{ (Ec. 1)}$$

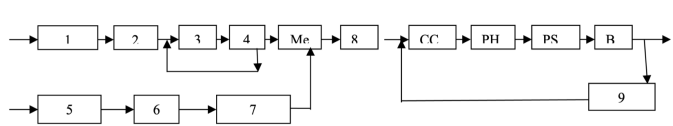
$$Y0^* = [C2][x1(1), \dots, x1(k), \dots, x1(n)]^* + [B2]U = 0 \text{ (Ec.2)}$$

Donde U es el vector columna de las variables del sistema, x1(k) es el vector fila de las variables de entrada al elemento k, excepto las variables incluidas en el vector U, mientras que [C1], [C2], [B1] y [B2] son las matrices de las ecuaciones restringidas.

Se ha referido (González, 2003) que los modelos de un proceso tecnológico de la producción de pulpa y papel pueden obtenerse de la agregación de los modelos de las etapas componentes; de ahí la importancia de obtener con calidad los modelos representativos de las etapas.

Resulta fundamental para la obtención de estos modelos realizar análisis estadísticos comprobatorios, que por lo general se omiten por muchos investigadores con el consecuente error durante la construcción de los modelos (Cornelio, 2024).

En la condición de países productores de azúcar de caña, y con ello de disponibilidad de bagazo como subproducto industrial los procesos, que han logrado exportaciones, han incluido el pulpeado del bagazo para garantizar la calidad de los productos (González y Quirós, 1985) 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 .1, con un total de 14 elementos, incluidos en las etapas de pulpeado del bagazo, preparación de la pulpa o el papel reciclado que es también importante (González y Quirós, 1985), mezclado de las pastas componentes, su refinación final y finalmente la Máquina de Papel.



**Figura 1** | Síntesis de un proceso tecnológico de fabricación de papeles industriales con pulpeado de bagazo de caña de azúcar

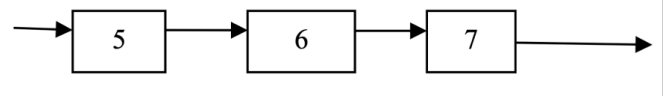
Los elementos y etapas se describen como sigue para todo

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
- MEZ. Mezclado de pastas componentes
8. Refinador de la cabeza de la Máquina de Papel
- 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

La calidad de un tipo de papel depende de las propiedades de la pasta que se utiliza como materia prima y las condiciones de la Máquina de Papel, en el caso de este estudio las mezclas de pasta se logran del uso de pulpa de bagazo y también de papel reciclado que debe ser adecuadamente preparado para su reuso en el proceso industrial en lo que se conoce como línea de papel recuperado aunque en ocasiones se puede incluir pulpa virgen no obtenida en la propia instalación (González,2003), por lo que en este estudio presentaremos los resultados referentes a la investigación en la etapa de tratamiento y refinación de papel reciclado en una instalación productora de papeles industriales (Cornelio,2024).

Esta etapa, que puede utilizarse indistintamente para procesar Pulpa Virgen Importada (pulpa de madera) o papel reciclado según sea la calidad exigida del producto final, está constituido por 3 elementos según se sintetiza en la **Figura 2**

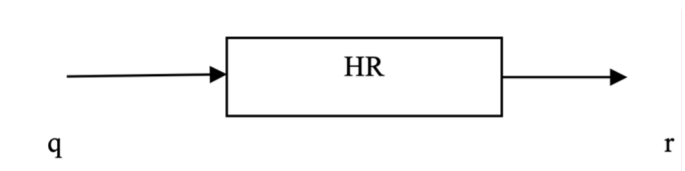


**Figura 2** | Esquema tecnológico de la etapa de preparación de pulpas recicladas (madera importada o papel recuperado)

**Constituidos por:**

5. Hidropulper
6. Depurado de papel reciclado
7. Refinado del papel reciclado

El estudio de los procesos recomendó que se considera en especial las variaciones de los factores que inciden en la refinación.



**Figura 3** | Esquema tecnológico sintetizado de la etapa de preparación de pulpas recicladas

La etapa de preparación de pulpa reciclada, que fue reforzada en capacidad de refinaion antes de este estudio, se sintetiza según la **Figura 4** y se agrega por el método de sistemas sin reciclo, con el vector de salida “r”, la matriz HR y el vector de entrada “q”, de la manera siguiente:

$$r = HR * q$$

Los parámetros de respuesta en el vector en esa etapa son:

YE= Factor de Estallido, medido en hojas formadas en el Laboratorio

YR= Resistencia al Rasgado, medido en hojas formadas en el Laboratorio

YA= Resistencia al Anillo, medido en hojas formadas en el Laboratorio

Yr= Toneladas de pasta por horas

Para esta etapa las variables de entrada o inherentes al proceso son:

X1= Amperaje del Refinador de papel reciclado

X2= Presión a la entrada del Refinador de papel reciclado

X3= Presión a la salida del refinador de papel reciclado

Las dependencias de los parámetros de respuesta, en esta etapa se describen a continuación:

$$YE = f1(X1, X2, X3)$$

$$YR = f2(X1, X2, X3)$$

$$YA = f3(X1, X2, X3)$$

$$Yr = f3(X1, X2, X3)$$

De acuerdo con esto, el modelo matricial para esta etapa de preparación de pastas recicladas es:

$$\begin{pmatrix} YE \\ YR \\ YA \\ Yr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0 & k_1 & k_2 & k_3 \\ l_0 & l_1 & l_2 & l_3 \\ m_0 & m_1 & m_2 & m_3 \\ n_0 & n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ X1 \\ X2 \\ X3 \end{pmatrix} \quad (Ec.3)$$

La investigación se desarrolló en una instalación industrial de fabricación de papeles industriales en operación adaptando las condiciones de experimentación a las posibilidades reales de la instalación industrial

**Datos experimentales**

Considerando la importancia de los planes experimentales en la investigación de la industria de procesos químicos (Concepción et al, 2021), los datos experimentales fueron obtenidos de un estudio estadístico inspirado en un diseño Box Wilson (1951) con doce datos industriales determinados directamente del control del proceso industrial y con los ensayos de calidad de producto final establecidos para el control del proceso en la instalación pero realizados sobre hojas hechas en un formador de laboratorio y aparecen en la **Tabla 1**.

**Tabla 1** | Plan experimental y resultados del estudio industrial de la etapa de preparación de pulpa reciclada.

N	X1	X2	X3	YE*	YR*	YA*	Yr*
1	77,6	1,49	0,30	21,23	76,66	15,43	2,28
2	69,0	1,86	0,46	24,79	89,09	18,96	1,69
3	71,7	2,17	1,05	22,50	89,90	20,23	2,22
4	63,25	1,81	0,65	18,75	120,0	20,70	2,30
5	64,30	1,64	0,54	21,66	105,0	16,93	2,31
6	59,30	1,73	0,30	18,95	111,6	21,10	2,31
7	60,66	1,85	0,57	22,35	111,6	21,20	2,32
8	91,0	2,23	0,41	27,70	125,0	21,50	2,11
9	81,60	2,12	1,50	21,23	83,33	20,40	2,14
10	68,0	2,32	1,72	22,08	101,6	17,80	2,14
11	79,0	2,16	1,52	24,79	107,5	18,80	2,15
12	76,0	1,32	1,44	19,37	130,0	20,00	2,19
S(Y)2				6,92	180,4	04,12	0,13

Los resultados experimentales fueron procesados por regresión múltiple obteniéndose los coeficientes correspondientes para cada parámetro de respuesta en función las tres variables independientes, que a su vez fueron estudiados para determinadas su significación acorde con la prueba t de Student, obteniéndose el modelo que matricialmente es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} YE \\ YR \\ YA \\ Yr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 22,3 & -0,063 & -1,39 & 7,02 \\ 57,83 & 0,22 & 11,6 & 9,27 \\ 15,23 & 0,0025 & 0,288 & 3,48 \\ 2,60 & -0,0026 & -0,03 & -0,46 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ X1 \\ X2 \\ X3 \end{pmatrix} \quad (Ec.4)$$

**Tabla 2** | Resultados experimentales y estimados por los modelos para verificar la adecuación de los mismos.

N	X1	X2	X3	YE*	YE**	YR*	YR**	YA*	YA**	Yr*	Yr**
1	77,6	1,49	0,50	21,25	18,9	76,66	96,82	15,43	17,59	2,28	2,17
2	69,0	1,86	0,46	24,79	18,6	89,09	98,85	18,96	17,53	1,69	1,68
3	71,7	2,17	1,05	22,50	22,10	89,90	108,5	20,23	19,67	2,22	2,92
4	63,25	1,81	0,65	18,75	20,36	120,0	98,76	20,70	18,17	2,30	2,95
5	64,30	1,64	0,54	21,66	19,00	105,0	96,00	16,93	17,74	2,31	2,58
6	59,30	1,73	0,50	18,95	19,40	111,6	97,27	21,10	17,65	2,31	2,19
7	60,66	1,85	0,57	22,35	20,16	111,6	96,23	21,20	17,86	2,32	2,13
8	91,0	2,23	0,41	27,70	24,13	125,0	117,8	21,50	21,30	2,11	2,14
9	81,60	2,12	1,50	21,23	24,74	83,33	114,3	20,40	21,26	2,14	2,13
10	68,0	2,32	1,72	22,08	18,77	101,6	115,6	17,80	22,05	2,14	2,11
11	79,0	2,16	1,52	24,79	25,30	107,5	113,3	18,80	21,32	2,15	2,11
12	76,0	1,32	1,44	19,37	25,78	130,0	103,2	20,00	20,61	2,19	2,3
S(Y) <sup>2</sup>				6,92		180,40		04,12		0,129	
S(Ad) <sup>2</sup>				16		469,98		7,87		0,154	
Prueba de Fisher (8,12)				2,34		2,61		1,01		1,198	

### Verificación del modelo del elemento

Para la verificación de la adecuación del modelo de este elemento se utilizó la prueba de Fisher según lo recomendado en la literatura científica (Adler et al, 1975); que al ser en todos los casos, menor que el tabulado de 2,85 (Akahnazarova, y Kafarov, 1982) verifica que los modelos son adecuados.

### Discusión de los resultados

Los modelos que describen el comportamiento antes las variaciones del amperaje y las presiones de entrada y salida del refinador de papel reciclado pronostican con exactitud estadísticamente aceptable el comportamiento de los parámetros de calidad en la pulpa de recorte refinada y su nivel de producción por hora.

El incremento del amperaje de la refinación beneficia los valores en la pasta de papel reciclado en lo referente al rasgado y la resistencia al anillo, pero en contraposición deprime los valores requeridos de en lo referente al estallido y la producción por hora de pasta de papel reciclado, por lo que considerando que seguramente incrementa los costos

en energía de refinación debe buscarse un equilibrio en su valor para lograr el mejor resultado en un proceso que es sin dudas multiobjetivo.

La presiones a la entrada y a la salida del refinador tiene también un efecto diferente sobre el estallido y la producción de pulpa de papel reciclado y los valores de del rasgado y el anillo orlo que el mismo procedimiento en la optimización multiobjetivo debe ser utilizado.

### 3. Conclusiones

1. Es factible caracterizar la etapa de preparación y refinación de las pastas de papel reciclado mediante un modelo matricial apoyado en relaciones lineales que permite ser utilizado en la obtención del modelo global del proceso tecnológico de obtención e papeles industriales.
2. Siendo los factores seleccionados de diferente impacto sobre parámetros importantes de la etapa de refinación del papel reciclado, es adecuado abordar su optimización mediante un método de optimización de objetivos múltiples.

### Contribuciones de los autores

**Milena Bárbara Cornelio Vera:** Elaboración del protocolo de investigación; diseño del trabajo; evaluación de variables y análisis estadístico; redacción del trabajo y corrección de observaciones.

**Erenio González Suárez:** Elaboración del protocolo de investigación; diseño del trabajo; evaluación de variables y análisis estadístico; redacción del trabajo y corrección de observaciones.

: Aprobación del protocolo de investigación; revisión de la base de datos; aprobación de versiones enviadas y editadas.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### 4. Referencias

ADLER, Yu.; MARKOVA, Yu. V. y GRANOVKYL. The Design of Experiment of Find Optimal Conditions. Moscow: MIR, 1975. 102 p.

AKAHNAZAROVA, S. y KAFAROV, V. Experiment Optimitation in Chemistry and Chemical Engineering. Moscow: MIR, 1982. pp. 240/293.

BOX, G. E. y WILSON, K. On experimental design attainment of optimum condition. Journal Re.stat. Soc., 1951, 13.

CONCEPCIÓN TOLEDO, D. N.; GONZÁLEZ SUÁREZ, E.; LÓPEZ BASTIDA, E. J. y RAMOS MIRANDA, F. Gestión del conocimiento en la proyección científica de la industria química mediante diseños experimentales. Universidad y Sociedad, enero-febrero 2021, pp. 446-451.

CORNELIO VERA, M. B. Modelación matemática y optimización del proceso tecnológico para la fabricación de papeles industriales [trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero Químico]. UCLV, 2024.

GONZÁLEZ SUÁREZ, E. y QUIRÓS DIPOTET, H. Influencia del por ciento de pulpa de bagazo semi química y el tipo de recorte en las propiedades del cartoncillo B-135. *Tecnología Química*, 1984, año V, no. 1, pp. 95–100.

GONZÁLEZ SUÁREZ, E.; CONCEPCIÓN TOLEDO, D. N. y LÓPEZ BASTIDA, E. J. Herramientas y métodos matemáticos en investigaciones para la formación de doctores desde la industria química. *Universidad y Sociedad*, 2023, 15(3), pp. 49–58.

GONZÁLEZ, E. Aplicación del análisis de procesos a la intensificación de distintas industria de Cuba [disertación para la obtención del grado de Doctor en Ciencias (Segundo Nivel de Doctorado)]. Santa Clara, Cuba: U.C.L.V., 1991.

MAMADE TOURE, B.; GONZÁLEZ SUÁREZ, E.; CURBELO SÁNCHEZ, A.; PERALTA SUÁREZ, L. M. y MIÑO VALDÉS, J. E. Herramientas de investigación para incrementar el impacto de la ciencia en la industria química. *Revista Científica de la UCSA*, 2017, 4(2), pp. 58–67. DOI 10.18004/ucsa/2409-8752/2016.003(02)058-067.

KAFAROV, V. *Cybernetic Methods in Chemistry and Chemical Engineering*. Moscow: MIR, 1976. pp. 464–470.

RUDD, D. F. y WATSON, C. C. *Strategy of Process Engineering*. La Habana: E.R., 1980. pp. 69–273.

WILLIAM, T. J. y NOVACK, R. S. Modelling Continous Plants for Process Control Survey. En: *DISCOP, IFAC*. Hungría, 1971. p. 4.