

Comunicación Corta

***DETERMINACIÓN DE MEJOR ALTERNATIVA INVERSIONISTA
CONSIDERANDO LA DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS EN UNA
PLANTA DE PREPARACIÓN DE PASTAS PAPELERAS***

***DETERMINATION OF THE BEST INVESTMENT ALTERNATIVE
CONSIDERING EQUIPMENT AVAILABILITY IN A PAPER PULP
PREPARATION PLANT***

Keila Ruiz Albelo^{1*} <https://orcid.org/0009-0006-8430-3114>
Agustín García Rodríguez² <https://orcid.org/0000-0002-8897-0671>
Erenio González Suárez² <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

¹ Unidad Empresarial de Base (UEB) Pulpa Cuba, Trinidad, Sancti Spiritus, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de La Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Noviembre 4, 2025; Revisado: Noviembre 17, 2025; Aceptado: Noviembre 29, 2025

RESUMEN

Introducción:

Las industrias productoras de papel deben garantizar que la preparación de pastas funcione con mínimos gastos inversionistas.

Objetivo:

Determinar las alternativas de menores inversiones que garanticen la producción anual de pastas requeridas para la fabricación de papel.

Materiales y Métodos:

Partiendo del modelo fiabilidad del sistema se determina la disponibilidad tecnológica actual, se exploran variantes de redundancia de equipos mediante un diseño experimental. Se corroboran resultados mediante Programación No Lineal de enteros y restricción del mínimo costo inversionista del obtenido del plan experimental.

Resultados y Discusión:

Al minimizar el valor inversionista de \$ 6 587 167,7 CUP, se obtuvieron los valores



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: Keila Ruiz, Email: keila.ra3027@gmail.com



necesarios de redundancias para los equipos, permitiendo aumentar la disponibilidad de la instalación desde 0,4336 hasta 0,9068.

Conclusiones:

El costo inversionista óptimo para mejorar disponibilidad en la etapa es de \$ 6587167,87, lo que representa un ahorro frente al costo en condiciones actuales. La planta aumenta su fiabilidad.

Palabras clave: disponibilidad; fiabilidad; inversión; papel; pastas.

ABSTRACT

Introduction:

Paper manufacturing industries must ensure that pulp production operates with minimal investment costs.

Objective:

To determine the lowest investment alternatives that guarantee the annual production of pulp required for paper manufacturing.

Materials and Methods:

Based on the system reliability model, the current technological availability is determined. Equipment redundancy options are explored through an experimental design, and results are corroborated using Nonlinear Integer Programming and the minimum investment cost constraint obtained from the experimental plan.

Results and Discussion:

By minimizing the investment value of \$6 587 167,7 CUP, the necessary redundancy values for the equipment were obtained, allowing the facility's availability to increase from 0,4336 to 0,9068.

Conclusions:

The optimal investment cost to improve availability at this stage is \$6 587 167,87, representing a saving compared to the cost under current conditions. The plant increases its reliability.

Keywords: availability; reliability; investment; paper; pulp.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de la empresa papelera estudiada se ve afectada por la obsolescencia tecnológica y las fallas en equipos del proceso de preparación de pastas, lo que hace necesario evaluar la fiabilidad del sistema, por ello se propone, siguiendo a Alemán et al. (2021), incrementar la fiabilidad mediante redundancias en equipos con alta probabilidad de fallos, mejorando la disponibilidad operativa, la producción y las ganancias anuales. Esto incluye evaluar los costos de inversión requeridos. Para ello, es clave estimar con precisión, en los estudios previos, las inversiones, tanto del proceso principal como de redundancias, utilizando bases de datos técnico-económicos y métodos de estimación de costos (Ley et al., 2021). Lograr la óptima eficiencia tecnológica es uno de los principales retos que enfrenta el país hoy en aras de una disminución de importaciones y promover las exportaciones, sin embargo en la

instalación estudiada, la disponibilidad operativa es baja.

En la estimación de los valores de las inversiones de las redundancias para incrementar la fiabilidad general del sistema tecnológico, se requieren datos técnico económicos y métodos de estimación de costos de los equipos de la industria química como la mostrada por Peters et al., (2003), y (Ley et al., 2021), lo que, partiendo de los datos reales de la industria, le otorgan un valor adicional, por la utilidad para la industria, reforzado cuando superan las limitaciones de otros estudios que no han considerado la incertidumbre en la disponibilidad de los equipos como el reportado por Hernández et al., (2012).

La crisis sanitaria de la COVID-19, incrementó la demanda de productos elaborados de papel (Hernández et al., 2021). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es determinar las alternativas de menores inversiones que garanticen la producción anual de pastas requeridas para la fabricación de papel.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los costos de los equipos se actualizan al año 2025 utilizando índices de costo (357,6 para 1990 y 800 para 2025), según lo propuesto por Peter et al., (2003).

2.1. Optimización mediante diseño experimental

En un esfuerzo de gestión del conocimiento en la industria química (Concepción et al., 2021) se acude primero a los planes experimentales para conocer el impacto de la redundancia de los equipos en la fiabilidad, disponibilidad y costos de una instalación.

Las variables consideradas fueron: X_1 : redundancia de la posición 1 de equipos redundados, X_3 : redundancia de la posición 2 de equipos redundados, X_4 : redundancia de la posición 3 de equipos redundados, X_6 : redundancia de la posición 4 de equipos redundados, X_7 : redundancia de la posición 5 de equipos redundados, X_2 y X_5 : falsas variables. Los parámetros de respuesta fueron: Y_1 : valor estimado de fiabilidad, Y_2 : valor estimado de inversión de capital.

2.2. Optimización de costos

El objetivo es minimizar los costos de inversión garantizando la fiabilidad. Se evalúan alternativas de redundancia para las bombas críticas. El método permite explorar arreglos con bajo esfuerzo experimental. El Plan experimental se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Plan experimental del estudio de redundancia de los equipos (Isacson 1970)

N	X_1	X_{f1}	X_3	X_4	X_{f2}	X_6	X_7
1	1	1	1	-1	1	-1	-1
2	1	1	-1	1	-1	-1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	1
4	-1	1	-1	-1	1	1	1
5	1	-1	-1	1	1	1	-1
6	-1	-1	1	1	1	-1	1
7	-1	1	1	1	-1	1	-1
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

2.3. Validación mediante programación no lineal en enteros (PNLE)

Para problemas con soluciones enteras (como el número de equipos redundantes), el PNLE es ideal. Así, para la optimización de costos con PNLE, la función objetivo es el valor de inversión, incluyendo costos de equipos redundados y no redundados. Las restricciones fueron: número de redundancias ($n_i \leq 3$), fiabilidad mínima ($R_t \geq 0,4336$), presupuesto máximo (\$ 658 167,873 CUP). La optimización confirma o ajusta los resultados del plan experimental, atestando una solución viable y eficiente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Situación actual de la fiabilidad y disponibilidad del sistema

El sistema actual de preparación de pastas tiene valores bajos de fiabilidad ($R_t = 0,2346$) y disponibilidad ($D_t = 0,7769$). Las fallas en equipos móviles, (las bombas de manejo de las pastas en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5) son el factor vital que reduce la fiabilidad y disponibilidad; y condiciona el desempeño global del sistema.

3.2. Optimización mediante diseño experimental

Se aplicó un diseño factorial con 7 variables y 8 experimentos para evaluar redundancias en equipos críticos (Isaccson, 1970), con los siguientes resultados: Ensayo óptimo (Variante 3): Inversión: \$ 6 587 167,87, Fiabilidad: 0,4336, Redundancia pedida: 2 equipos para bombas 1, 2, 4, y 5; así como un equipo para la bomba 3.

3.3. Optimización con programación no lineal entera (PNLE)

Como oportunidad de la optimización en la industria transformativa (González et al., 2022), se utilizó el método PNLE para validar los resultados del diseño experimental. Mediante la ecuación 1 que relaciona la capacidad a instalar con la necesaria de diseño y la disponibilidad, se pudo optimizar las inversiones a realizar lo que se muestran comparativamente con los actuales como resultados de la Tabla 2 :

Tabla 2. Resultados de la optimización de las inversiones

<i>Forma</i>	<i>Fiabilidad</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Inversión</i>
Actual	0,2346	0,7769	\$7 184 941,99
Optimizada	0,4336	0,9068	\$6 587 167,87

Relación entre capacidad de diseño y disponibilidad:

$$\text{Capacidad a instalar (t/d)} = \frac{\text{Capacidad de diseño}}{\text{Disponibilidad del sistema}} \quad (1)$$

El impacto operacional se refleja en que la capacidad requerida para las mejores redundancias es solo de 70 t/d, siendo la actual de 92 t/d (debido a baja disponibilidad), y la óptima de 77 t/d (reducción del 16% vs. condiciones actuales).

3.4. Análisis económico

Se consideró un periodo asumiendo eficiencias operativas del 70 % en el primer año, 80 % en el segundo y 90 % a partir del tercero, con ajustes técnicos y aprendizaje. Siendo

los resultados obtenidos de VAN positivo, que indica rentabilidad al superar la inversión inicial y el costo de capital, TIR elevada lo que confirma alta rentabilidad y beneficios significativos, PRI \approx 2 años, que coincide con la estabilización operativa reduciendo riesgo financiero.

4. CONCLUSIONES

1. El costo inversionista óptimo para mejorar disponibilidad en la etapa es de \$ 6 587 167,87, lo es un ahorro frente al costo en condiciones actuales.
2. La planta, con una fiabilidad inicial de solo 0,2346 crece a 0,4336 con la implementación de la redundancia propuesta en las bombas de las posiciones 1, 2, 4 y 5.

REFERENCIAS

- Alemán, L., Hernández, C. B., Santos, R., Fleites, Y., & González, E. (2021). Optimización de la ganancia en una instalación industrial mediante inversiones que incrementen su disponibilidad operativa. *Tecnología Química*, 41(2), 296-310. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v41n2/2224-6185-rtq-41-02-296.pdf>
- Concepción, D. N., González, E., López, E. J., & Ramos, F. (2021). Gestión del conocimiento en la proyección científica de la industria química mediante diseños experimentales. *Universidad y Sociedad*, 13(2), 446-451. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1984?articlesBySameAuthorPage=3>
- González, E., Concepción, D. N., Quezada, W. F., Albornas, Y., de Armas, A. C., & Miño, J. E. (2022). Gestão do conhecimento na indústria transformadora através da aplicação de métodos de otimização. *Universidad y Sociedad*, 14(1), 273-279. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2630?articlesBySameAuthorPage=2>
- Hernández, I., Osti, M., Vázquez, M. A., & Villagomez, J. R. (2021). Obtención de papel artesanal a partir de *S. Californicus* del lago de Tecocomulco y estudio de su biodegradabilidad. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(Especial 2), 162–167. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iEspecial2.7991>
- Hernández, J. P., García, A., Ruiz, T., Expósito, O., & Rodríguez, F. A. (2012). Evaluación tecnológica del proyecto del sistema de preparación de pastas en la fábrica de papel "Pulpa Cuba". *Tecnología Química*, 32(1), 63-72. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v32n1/rtq07112.pdf>
- Isaccson, W. B. (1970). Statistical Analyses for Multivariable Systems. *Chem Eng.*, (6), 69-75
- Ley, N., González, E., Hernández, J. P., & Ramos, F. (2021). *Contribución del diseño de instalaciones de la industria química a minimizar la incertidumbre a través de estudios previos inversionistas*. Editorial Feijóo. https://isbncuba.ccl.cerlalc.org/catalogo.php?mode=busqueda_menu&id_materia=660.2
- Peters, M. S. Timmerhaus, R., & West. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill Education.
-

https://books.google.com.cu/books/about/Plant_Design_and_Economics_for_Chemical.html?id=3uVFkBBHyP8C&redir_esc=y

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Keila Ruiz Albelo. Conservación de datos, Investigación, Redacción – primera redacción.
 - Dr.C. Agustín García Rodríguez. Redacción - revisión y edición.
 - Dr.Cs. Erenio González Suárez. Gestión de proyectos, Supervisión, Conceptualización.
-