

## MODELACIÓN DE LA PARTE HÚMEDA DE LA MÁQUINA DE PAPEL Y EL CIRCUITO DE AGUA EN LA “UEB PULPA CUBA”

## MODELLING PAPER FORMATION AND THE WATER CIRCUIT IN THE “UEB PULPA CUBA”

Ing. Lilisbet Castellanos Gallo<sup>1</sup>, Dra.C. Meilyn González Cortés<sup>1</sup>, Dr.Sc. Erenio González Suárez<sup>1</sup>.

### Afiliación

<sup>1</sup> Centro de Análisis de Procesos, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas Villa Clara, Cuba

e-mail: [lilibetcg@uclv.cu](mailto:lilibetcg@uclv.cu); [mgonzalez@uclv.edu.cu](mailto:mgonzalez@uclv.edu.cu)

### Resumen

El trabajo muestra los resultados del estudio realizado en la Papelera Pulpa Cuba de Trinidad con la finalidad de obtener los modelos que caracterizan la operación de la parte húmeda de la máquina y el esquema de distribución óptima de agua de proceso mediante la aplicación de un procedimiento que permitió medir el impacto técnico y económico de la tecnología de producción. Se abarcan aspectos relacionados con la evaluación de tecnologías, la producción de papel y la utilización de técnicas estadísticas y estrategias de integración de procesos con el fin de mejorar la producción objeto de estudio. Mediante la utilización de la regresión lineal múltiple como técnica estadística y la ayuda del Software Statgraphics Plus 5.1 se obtuvieron los modelos que describen y predicen el comportamiento de las propiedades finales del papel, además se determinaron las condiciones óptimas de operación de dicha sección aplicando la optimización jerárquica. Se determinó el circuito óptimo de reciclaje de aguas a través del planteamiento matemático del problema y con ayuda del Software LINGO<sup>TM</sup> logrando disminuir el consumo de agua fresca y de materia prima. Finalmente se realizó un análisis económico que incluye la determinación de los indicadores estáticos y dinámicos para los cambios propuestos.

**Palabras Claves:** Evaluación de tecnologías, estrategia de integración, regresión lineal múltiple, optimización jerárquica, circuito óptimo.

### Abstract

The present work shows the results of the study carried out in the paper factory “Pulpa Cuba” from Trinidad in order to obtain models that characterize the operation of the wet end of the machine and the optimal distribution scheme process water by applying a procedure that measured the technical and economic impact of production technology.

The paper begins with a literature review that addresses issues related to technology assessment, paper production and use of statistical techniques and process integration strategies in order to improve production under study. Using multiple linear regression as a statistical technique and the help of Statgraphics Plus 5.1 Software. Were obtained models describe and predict the behavior of the final properties of the paper, is also determined operating condition of this section using hierarchical optimization. The optimal circuit water recycling was determined through mathematical approach to the problem and achieving LINGO<sup>TM</sup> Software helps reduce the consumption of fresh water and raw materials. Finally, an economic analysis that includes determining static and dynamic indicators for the proposed changes was carried out.

**Key Words:** Technology assessment, integration strategies, multiple linear regression, hierarchical optimization, optimal circuit.

## 1. Introducción

La situación que atraviesa la industria papelera mundial en cuanto escasez de capital, de materias primas y el impacto que la misma tiene sobre el ambiente la ha encaminado a aplicar herramientas y técnicas de evaluación para obtener soluciones prácticas que le permiten no solo aumentar las producciones sino también disminuir el impacto ambiental de sus residuales.

La industria del papel en Cuba no está exenta de esta situación pues ha sufrido cambios y transformaciones en sus esquemas tecnológicos, motivado principalmente por los cambios de materias primas. Las tecnologías datan de los años 50 en la mayoría de los casos, declarándose por tanto obsoleta o no adecuada para el procesamiento de fibras de papel de desperdicio. Motivo por el cual está obligada a ser más eficiente su proceso productivo logrando que la gama de productos que fabrica sean competentes en el mercado, tanto desde el punto de vista de calidad como de costo.

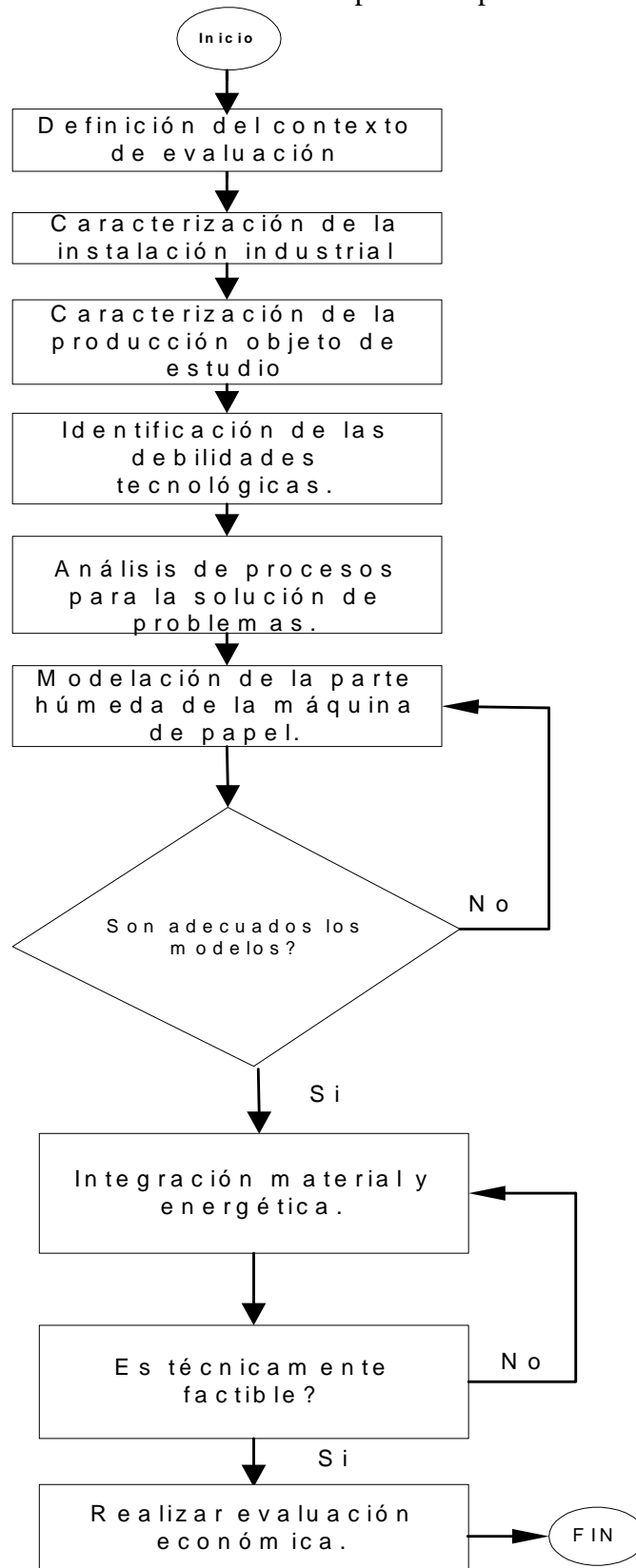
Son numerosos los estudios que en el área investigativa se han desarrollado para entre otros aspectos identificar las debilidades tecnológicas en el proceso de fabricación de papel. Entre los métodos empleados se encuentran las técnicas estadísticas y el análisis de integración de procesos cuya aplicación ha permitido visualizar soluciones óptimas de mezcla de fibras y de reutilización de aguas blancas, además de determinar las condiciones de operación más adecuadas para la planta.

El presente trabajo tiene lugar en la Papelera Pulpa Cuba, en la cual se pueden identificar deficiencias tecnológicas que inciden negativamente sobre las propiedades del producto final, también se tienen elevados consumos de agua y pérdidas de fibra con el consecuente aumento de los costos de producción por concepto del incremento de los índices de consumo.

En esta fábrica se han desarrollado numerosos trabajos en los que se han identificado las variables de mayor incidencia en el proceso, se han propuesto condiciones de operación para elevar la eficiencia del mismo. También se han realizado estudios de los circuitos de agua proponiendo esquemas para un manejo eficiente de este recurso que han reportado ahorros para el proceso pero aun así persisten debilidades ya que los estudios realizados han tenido sus limitaciones y especificidades ya que o bien se han realizado en otras condiciones de trabajo de la planta dado que se han efectuado en etapas anteriores o sus objetivos han estado encaminados a otros indicadores de eficiencia. Tal es el caso de estudios realizados en la planta para la reutilización del agua en los que se han identificados oportunidades de reciclaje pero no se ha determinado el esquema óptimo para ello.

## 2. Materiales y Métodos

Se desarrolló una metodología general de evaluación tecnológica que permitiera llevar a cabo el análisis técnico- económico en la Papelera Pulpa Cuba.



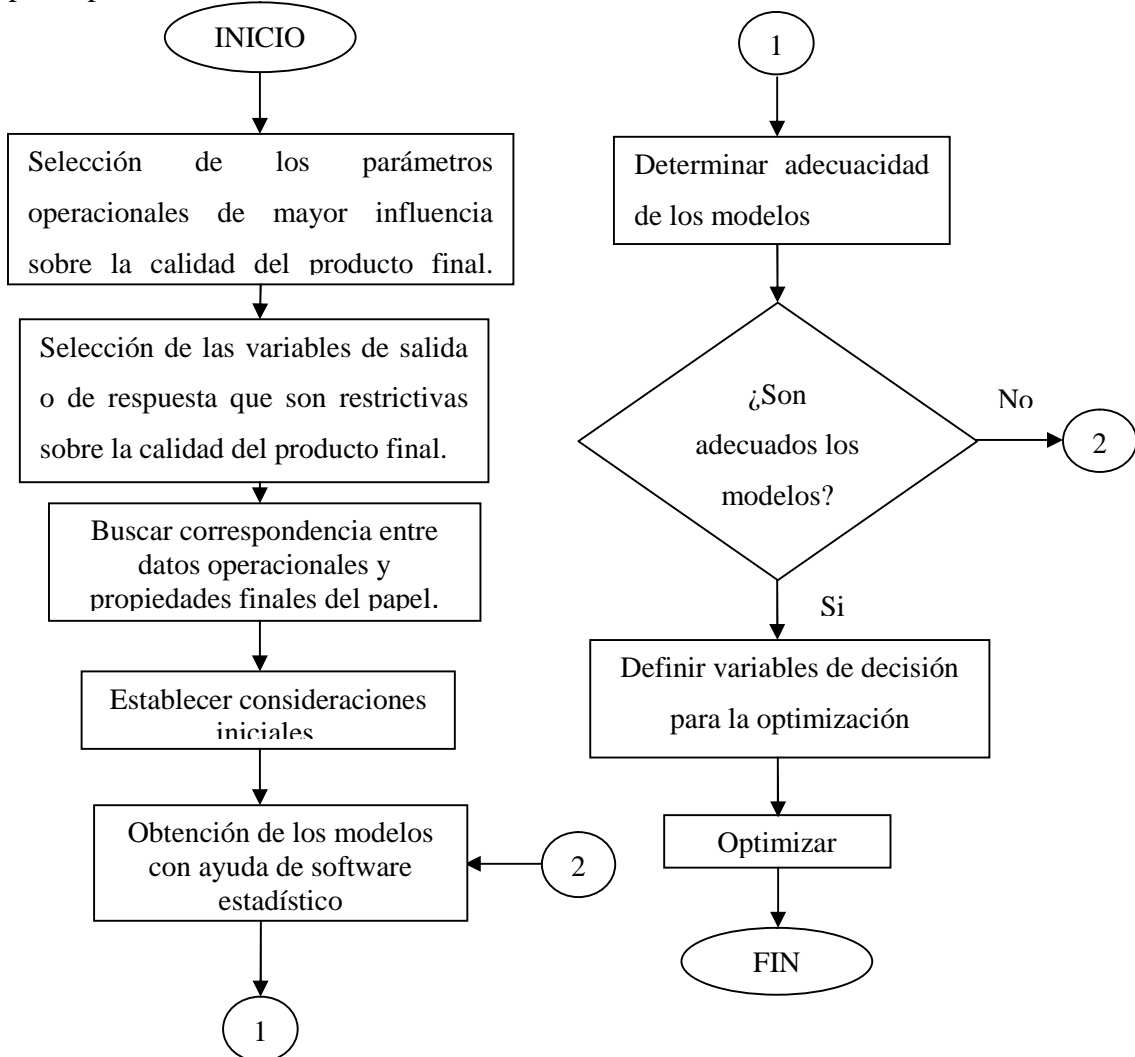
**Figura 1.** Metodología general para la evaluación tecnológica.

Siguiendo la metodología planteada se realizó una descripción detallada del proceso productivo identificando las debilidades tecnológicas principalmente en la parte húmeda de la máquina de papel.

Como parte de la metodología general se traza una estrategia de modelación para la sección objeto de estudio.

Para realizar la obtención de los modelos de la sección de refinado y de la parte húmeda de la máquina de papel primeramente fue necesario apoyarse en estudios preliminares semejantes que tienen lugar en dicha planta elaborados por (*González, 1986*) y (*Gutiérrez, 1989*). Es importante aclarar que dichos trabajos, al igual que los anteriores a ellos, estaban centrados en optimizar la composición de fibras de la pasta para el mejoramiento de las propiedades del papel, dado que en aquella fecha la fábrica trabajaba con pulpa de bagazo y pulpa de papel reciclado.

Después de realizar un estudio del proceso de obtención de papel en la Papelera Pulpa Cuba principalmente de la formación de la hoja de papel en el fourdrinier de los factores tecnológicos y operacionales que mayor influencia tienen sobre la formación, así como de los resultados de proyectos similares anteriores es que fue posible plantear una secuencia de actividades que conforman la estrategia de modelación que incluye la optimización, en la figura siguiente se muestra el diagrama heurístico que guiará los pasos para la modelación.



**Figura 2.** Diagrama heurístico de la estrategia de Modelación.

El proyecto incluye la integración de masa para el manejo eficiente del agua. A continuación se establece la estrategia que debe aplicarse para alcanzar la meta de minimización del consumo de agua y de generación de los residuales, en cada paso se explica detalladamente como se debe llevar a cabo el procedimiento, la estrategia se aplica al proceso de producción de papel en la papelería Pulpa Cuba.

La estrategia se fundamenta en el empleo de herramientas de integración de procesos, estos pasos se describen a continuación:

1. Reunir los datos requeridos para la aplicación de las herramientas de integración de masa (diagrama fuente-sumidero), necesarios para resolver el problema específico.
2. Identificar las posibilidades de mezclado, reciclado directo y las necesidades de intersección de flujos.
3. Planteamiento de la estrategia matemática para encontrar la variante óptima de reciclado de corrientes y minimización del consumo de agua.
4. En el caso de intersección de flujos, analizar el equipamiento que puede ser empleado en el caso de estudio para la separación de la especie contaminante, la cual se acumulará en el proceso producto de la operación de reciclado.
5. Evaluación económica de la variante óptima.

### 3. Resultados y Discusión

**Tabla 1.** Variables de entrada y de respuesta incluidas en el estudio de modelación.

| <i>Variables de entrada</i>                              | <i>Valor normado</i> | <i>Intervalo de variación</i> | <i>Variables de salida</i>                 | <i>Valor normado</i> | <i>Intervalo de variación</i> |
|--|----------------------|-------------------------------|--|----------------------|-------------------------------|
| <b>X1:</b> Velocidad Máquina Papel (m/min) (V)           | 100-110              | 95-130                        | <b>Y1:</b> Peso básico (g/m <sup>2</sup> ) | 175 ±5 %             | 118,4-186,3                   |
| <b>X2:</b> Nivel Caja cabecera (adimensional)            | 1,05*V               | 95-120                        | <b>Y2:</b> Estallido (KPa)                 | 160 min              | 180,0-214,0                   |
| <b>X3:</b> Vacío Rolo Coucha (Kgf/cm <sup>2</sup> )      | 0,50 máx.            | 0,1-0,6                       | <b>Y3:</b> Tensión DM (Kg)                 | 4,5 min              | 1,20-5,60                     |
| <b>X4:</b> Vacío de la prensa #1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )  | 0,55 máx.            | 0,1-0,2                       | <b>Y4:</b> Tensión DT (Kg)                 | 4,5 min              | 1,25-4,20                     |
| <b>X5:</b> Vacío de la prensa # 2 (Kgf/cm <sup>2</sup> ) | 0,55 máx.            | 0,1-0,2                       | <b>Y5:</b> Rasgado DM                      | 1,10 min             | 0,72-4,50                     |
| <b>X5:</b> Consistencia Caja Cabecera (%)                | 1,20 máx.            | 0,85-1,45                     | <b>Y6:</b> Rasgado DT                      | 1,10 min             | 0,92-4,12                     |
| <b>X6:</b> Freeness Caja cabecera (°SR)                  | 30-40                | 20-62                         | -  | -                    | -                             |

**Tabla 2.** Modelos obtenidos para cada variable respuesta.

| <i>Variable dependiente</i> | <i>Modelo estadístico</i>  | <i>P-Valor</i> | <i>Fcal</i> | <i>Ftab</i> |
|-----------------------------|--|----------------|-------------|-------------|
| Peso Básico                 | $102,332 + 41,3712*X3 + 49,1358*X6$                              | 0,0129         | 5,21        | 5,57        |
| Estallido                   | $190,196 - 0,377382*X1 + 0,452466*X2 - 11,4562*X3 - 0,141662*X7$ | 0,0140         | 3,81        | 4,11        |
| Tensión dirección máquina   | $7,12085 - 1,39934*X6 - 0,0249463*X7$                            | 0,0319         | 3,92        | 5,49        |
| Tensión dirección tela      | $1,32391 - 0,021283*X1 + 0,0329961*X2$                           | 0,0145         | 4,92        | 5,52        |
| Rasgado dirección máquina   | $2,28646 - 0,0141106*X1 - 0,319897*X3 + 2,64246*X4$              | 0,0173         | 3,91        | 4,45        |
| Rasgado dirección Tela      | $4,81585 - 0,0420293*X1 + 8,51833*X4$                            | 0,0234         | 4,27        | 5,39        |

Los modelos obtenidos son válidos para las condiciones de entrada ensayadas y ayudan a prever el comportamiento de las variables respuesta y de esta forma tener un control sobre esta parte del proceso y poder evaluar la eficiencia del mismo.

### 3.1 Optimización de las variables operacionales.

El análisis de los modelos condujo a que existen variables de entrada que tienen una influencia positiva en determinadas variables respuestas sin embargo se observa que en otros casos la misma variable independiente influye negativamente.

Como puede observarse de esta manera es imposible establecer un rango de operación que genere resultados óptimos en las propiedades medidas, ya que el aumento o disminución de las variables independientes.

Es por lo anterior, que se hace necesario organizar en orden de importancia para evaluar la calidad del producto final, las variables respuestas y obtener en base a esto las condiciones óptimas de operación.

Para dar solución a esta problemática, se recurrió a una optimización jerárquica, en la cual se optimizaron paso a paso cada una de las variables de acuerdo a su grado de importancia, comenzando por la de mayor importancia. El orden se estableció siguiendo el criterio de especialistas de la industria de la pulpa y el papel y fue el siguiente: peso básico, estallido, tensión dirección máquina, tensión dirección tela, rasgado dirección máquina y rasgado dirección tela.

La optimización fue realizada con ayuda del software (*LINGO<sup>TM</sup>, 2002*) la función objetivo planteada fue la maximización de las variables respuestas en el intervalo de variación de las variables independientes. Se plantearon como restricción los valores normados de las variables respuestas.

Los resultados obtenidos mostraron que las condiciones óptimas en la calidad del papel se obtienen cuando las variables independientes toman los siguientes valores:

**Tabla 3.** Condiciones óptimas de operación.

|                | <b>Variable</b>                     | <b>Valor óptimo</b> |
|----------------|-------------------------------------|---------------------|
| X <sub>1</sub> | Velocidad Máquina Papel, (m/min)    | 130,0               |
| X <sub>2</sub> | Nivel Caja cabecera, (adimensional) | 95,0                |

|                |   |      |
|----------------|---|------|
| X <sub>3</sub> | Vacío Rolo Coucha, (Kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,60 |
| X <sub>4</sub> | Vacío de la prensa #1, (Kgf/cm <sup>2</sup> ) | 0,20 |
| X <sub>6</sub> | Consistencia Caja Cabecera, (%)               | 0,85 |
| X <sub>7</sub> | Freeness Caja cabecera, (°SR)                 | 62,0 |

### 3.2 Análisis del circuito de agua e Integración de masa

El proceso actual demanda 476683,95 kg/h de agua y se generan 440221,65 kg/h de efluentes acuosos con posibilidades de ser reciclados, si este último se logra reciclar en la mayor proporción se tendrá en el proceso un uso y manejo eficiente del agua a través del aprovechamiento de las corrientes acuosas generadas en el mismo.

Como solución del problema se obtuvo también que el consumo mínimo de agua fresca una vez aplicada la técnica de integración es de 875,09 t/d significando esto un índice de consumo de 11,67 m<sup>3</sup>agua/ t papel. Atendiendo a esto se resume que el índice de consumo de agua rebasa la norma, si se tiene en cuenta que el consumo actualizado de este tipo de fábricas es de 4,9 m<sup>3</sup> de agua por cada tonelada de papel producido. No obstante, aunque el índice de consumo es superior al normado, el valor es mucho más cercano al obtenido en trabajos anteriores en esta fábrica 69,21 m<sup>3</sup>/t de papel (*Soto, 2005*) y 117 m<sup>3</sup>/t de papel de papel (*Rodríguez, 2009*).

### 3.3 Análisis económico.

Para el análisis económico se tienen en cuenta dos variantes, una sin incluir el cierre de circuitos y las demás mejoras tecnológicas y la otra incluyendo los nuevos equipos para el cierre de circuitos y mejora de la calidad del producto final

**Tabla 4.** Resultados de la evaluación económica.

| <i>Aspecto</i>                       | <i>Variante # 1</i> | <i>Variante # 2</i> |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Agua Consumida (m <sup>3</sup> /año) | 296235              | 157516              |
| Índice de consumo OCC (t /tpapel)    | 1,26                | 1,14                |
| Costo de materias primas (\$/año)    | 1902139,20          | 2522264,23          |
| Ingresos por ventas (\$/año)         | 6374440,80          | 9193905,00          |

Al realizar el análisis económico de las alternativas propuestas se observa como para la variante número dos en la cual se incluyen las mejoras tecnológicas del proceso se produce una disminución del consumo de agua en la fábrica, disminuye además el índice de consumo de materia prima aunque su costo aumenta esto se produce debido a que existe un incremento de la producción diaria introducida por un incremento de la eficiencia en la planta, por ultimo se observa como aumentan los ingresos por venta ya que se obtienen productos de mayor calidad, demostrando la factibilidad económica de la variante numero dos.

## 4. Conclusiones

1. Las variaciones en las condiciones de operación y el elevado índice de consumo de agua repercuten negativamente en la calidad del papel obtenido y en la eficiencia del proceso siendo esto una debilidad de la tecnología de producción.
2. Los modelos que caracterizan la parte húmeda de la máquina de papel son: peso básico, estallido, tensión dirección máquina y dirección tela, rasgado dirección máquina y dirección tela.

3. Las variables independientes que definen los modelos obtenidos son: velocidad de la máquina de papel, nivel en la caja cabecera, vacío en el rolo coucha, vacío en la primera prensa, consistencia en caja cabecera y freeness en caja cabecera.
4. Existen variables como velocidad en máquina de papel y freeness en caja cabecera cuyo intervalo de variación está fuera de lo normado, ocurre de manera similar en las variables de salida.
5. Los resultados óptimos de las propiedades del papel se obtienen cuando las variables independientes toman los valores: Velocidad Máquina Papel 130 m/min, Nivel Caja cabecera 95, Vacío Rolo Coucha 0,60 Kgf/cm<sup>2</sup>, Vacío de la prensa #1 0,20 Kgf/cm<sup>2</sup>, Consistencia Caja Cabecera 0,85% y Freeness Caja cabecera 62<sup>0</sup>SR.
6. Al implementar el cierre de circuitos se logra disminuir el índice de consumo de OCC a 1,14 t / t papel.
7. Con la redistribución en el circuito de aguas de la planta se alcanza como consumo óptimo un valor de 875 m<sup>3</sup> de agua fresca por día representando una disminución del 46,82% con una reducción considerable del vertimiento de residuales.
8. Los cambios propuestos en el circuito de aguas de la Papelera Pulpa Cuba son factibles aportando una ganancia de 249005,36 \$/a, con un plazo de recuperación al descontado de 3 años y una tasa de rendimiento interna del 69%.

## 5. Bibliografía

1. CRIPPS, H. (2000) *"Process integration in the pulp and paper industry"*. Tappi journal, 81 (10)
2. DELGADO , A. (1990) *"Estrategia Para el Cálculo de Balances de Materiales en la Industria del Papel."*. Tesis de Diploma, Universidad Marta Abreu de las Villas, Departamento de Ingeniería Química.
3. GARRISON, G. & EL-HALWAGI, M. (2000) *"A Global Approach to Integrating Enviromental, Energy, Economic, and Technological Objectives"*.
4. GONZÁLEZ, E. (1982) *"Modelación y Optimización de un Proceso Tecnológico para la Producción de Cartoncillo para Corrugar"*. Trabajo de Disertación para Obtener el Grado de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
5. GONZÁLEZ, M. (1986) *"Optimización de la Preparación de Pastas de Madera en la Papelera "Pulpa Cuba"*". Trabajo de Diploma, Universidad Marta Abreu de las Villas, Departamento de Ingeniería Química.
6. GONZÁLEZ, M. (2006) *"Impacto global de una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular"*. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Facultad de Química Farmacia. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Departamento de Ingeniería Química.
7. GUTIERREZ, S. (1989) *"Modelos Matemáticos de la Máquina de Papel para la Obtención de linner base 200 g/m<sup>2</sup>"*. Trabajo de Diploma, Facultad de Química Farmacia. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
8. HERNÁNDEZ, J. (1985) *"Modelación Matemática de la Máquina de Papel en el Combinado de Papeles Blancos "Panchito Gómez Toro"*". Trabajo de Diploma, Facultad de Tecnología Química Azucarera. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
9. MAYO, O. (2005) *"Técnicas Básicas de Optimización"*. Editorial Félix Varela.
10. QUINTANA, L. (2011) *"Modelos Matemáticos para Predecir y Describir la Influencia de las Variables de Operación de la Parte Húmeda de la Máquina de"*



- Papel sobre la Calidad del Linner 175 g/m<sup>2</sup> que se Produce en la Planta de Papel de la Papelera Pulpa Cuba". Tesis de Diploma, Universidad José Martí Pérez.*
11. RODRÍGUEZ, F. (2009) *"Reducción de los consumos de fibra y agua en la Papelera Pulpa Cuba de Trinidad"*. Tesis en opción al título de máster en Análisis de Procesos en la Industria Química. , Universidad Central Marta Abreu de Las Villas,
  12. SOTO, D. (2005) *"Aplicación de un procedimiento de evaluación tecnológica en la Papelera Pulpa Cuba"*. Trabajo de diploma, Facultad de Química Farmacia. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
  13. STATGRAPHICS, M. (2007) *"Análisis de regresión múltiple"*.