

# Método de Análisis para realizar estudios de integración energética entre procesos de fabricación de Azúcar Crudo, Pulpa y Papel de Bagazo.

**J. F. Puerta Fernández, J. A. Castellanos Álvarez, F. González Pérez.**

Departamento de Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica.  
Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".  
Carretera a Rodas, Km. 4. Cuatro Caminos. Cienfuegos 59430. Cuba.  
jfpuerta@fmec.ucf.edu.cu ; teléfono 0432-511965

(Recibido el 12 de Junio de 2003, aceptado el 6 de Octubre de 2003).

## Resumen.

En el trabajo se propone un método heurístico para realizar estudios de Integración Energética entre los procesos de fabricación de Azúcar Crudo, Pulpa y Papel de Bagazo, que mediante el empleo de una serie de ecuaciones de regresión, especialmente desarrolladas, se pueden generar los escenarios específicos para integrar dichos procesos y satisfacer sus demandas de calor y energía eléctrica durante todo el año.

**Palabras Claves:** Integración energética, integración de procesos.

## 1. Introducción.

Los precios del petróleo, no obstante sus fluctuaciones, muestran marcada tendencia al crecimiento, lo que junto a la disminución de los precios del azúcar, dificultan cada vez más la sostenibilidad de este sector industrial cubano; así mismo la industria papelera, pequeña, con limitado desarrollo tecnológico y un mercado de sus productos afectado por no lograr precios competitivos, entre otras razones, por el alto costo energético, necesitan hallar soluciones que las hagan menos dependientes de sus actuales producciones.

La diversificación de la Industria Azucarera planteada por Cuba, aprovecha el potencial que ofrece la disponibilidad de biomasa cañera y el desarrollo de las tecnologías de Cogeneración Azucareras y se proyecta estratégicamente en incluir la energía eléctrica entre sus principales producciones, inclusive en el período posterior a la zafra.

Resultados de investigaciones, publicados con anterioridad [4, 5] demuestran que la Integración Energética de estos procesos es viable, tanto técnica como económicamente, dado que pueden ser satisfechas las demandas de vapor y electricidad durante todo el año, siempre que se tomen en cuenta una serie de variables (variables de integración) [6, 7] que tienen alta

influencia en las principales características termoenergéticas de los procesos energéticamente integrados (variables de decisión).

## 2. Desarrollo.

El modelo energético de integración, cuyo esquema se muestra en la figura 1, concibe para su unidad de producción de las energías (CTE), los generadores y turbinas de vapor estrictamente necesarios, en correspondencia con las estrategias de operación y explotación, representadas por las "Variables de Integración", la C.T.E. de dicho sistema, como unidad productora de todo el vapor y la electricidad que se genere está dispuesta con generadores de vapor para la quema de bagazo, médula del bagazo, paja de caña y petróleo, ya sea en co-combustión o en quema independiente, en dependencia de las soluciones que estén disponibles para ello. Tendrá además la C.T.E una turbina de vapor de condensación con dos niveles de extracción del vapor, la primera a la presión y temperatura que demandan los procesos de fabricación de pulpa y papel de bagazo y la segunda al nivel usualmente empleado en los ingenios azucareros, condicionado por el sistema de calentamiento-evaporación-cocción que define el consumo del ingenio y fija límites para los parámetros del vapor.

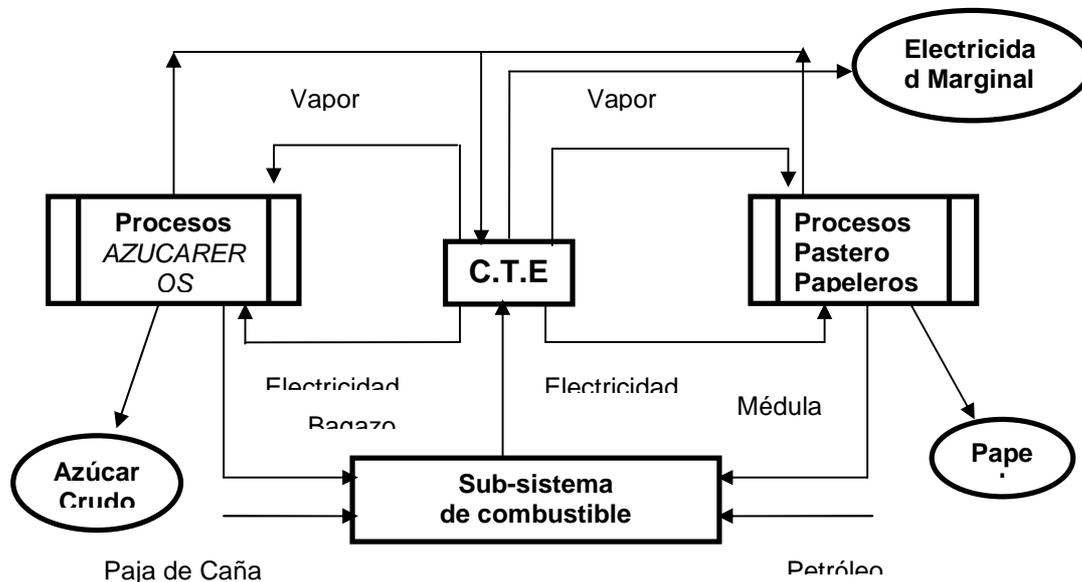


Figura 1 Modelo energético de integración.

El método de integración que se propone y se explica con la ayuda del diagrama de bloques de la figura 2, propicia el desarrollo de soluciones más generales o escenarios específicos, según el cambio y tendencia de las variables de integración, así como de otros criterios y no fija una solución única, es decir sigue un procedimiento heurístico de solución.

### 3. Cálculos previos.

La disponibilidad de bagazo combustible (BD) del período de un año se determinará como:

$$BD = (CMA * CBC) - BFP \dots \dots \dots (t/año) \quad (1)$$

donde:

- CMA - Cantidad de caña molida en el período.
  - CBC - Contenido de bagazo en la caña según resultados de laboratorio o estimado de acuerdo a la variedad de caña.
  - BFP - Cantidad de bagazo integral que pasa al proceso de desmedulado para la fabricación de pulpa de bagazo para papel. Esta cantidad es función de la cantidad de papel a producir y el contenido de pulpa de bagazo en la fórmula de papel (FP).
- Se considerará como disponibilidad de médula, aquella cantidad de finos y meollo, que de acuerdo con los reportes de laboratorio son extraídos del bagazo integral (BFP) destinado a la fabricación de pulpa para papel.

La disponibilidad de paja de caña para fines combustible puede ser determinada, según estudios realizados por diferentes investigadores que son referenciados en [9] del siguiente modo:

$$CPC = DP * dz \quad (2)$$

Donde:

CPC = Disponibilidad de paja de caña 25% de humedad en el período de un año.

dz = días de zafra al año.

DP = Disponibilidad diaria de paja de caña

$$DP = \sum (CP * CQ * PQ) + (CP * CN * PCN) \quad (3)$$

Donde:

CP = Total de caña procesada en centros de acopio y limpieza.

CQ = Cantidad de caña quedada.

PQ = Cantidad de paja en la caña quedada.

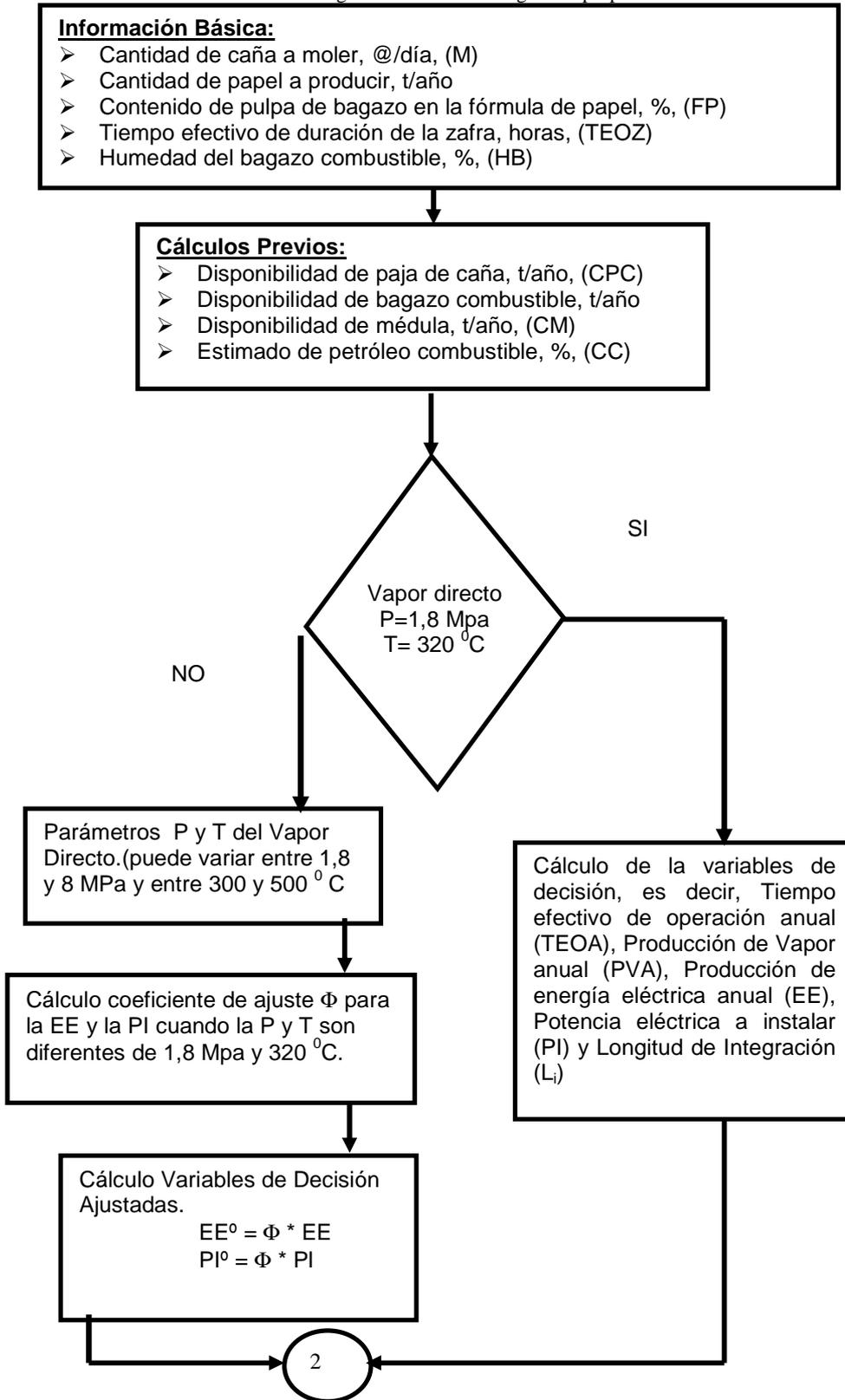
CN = Cantidad de caña nueva

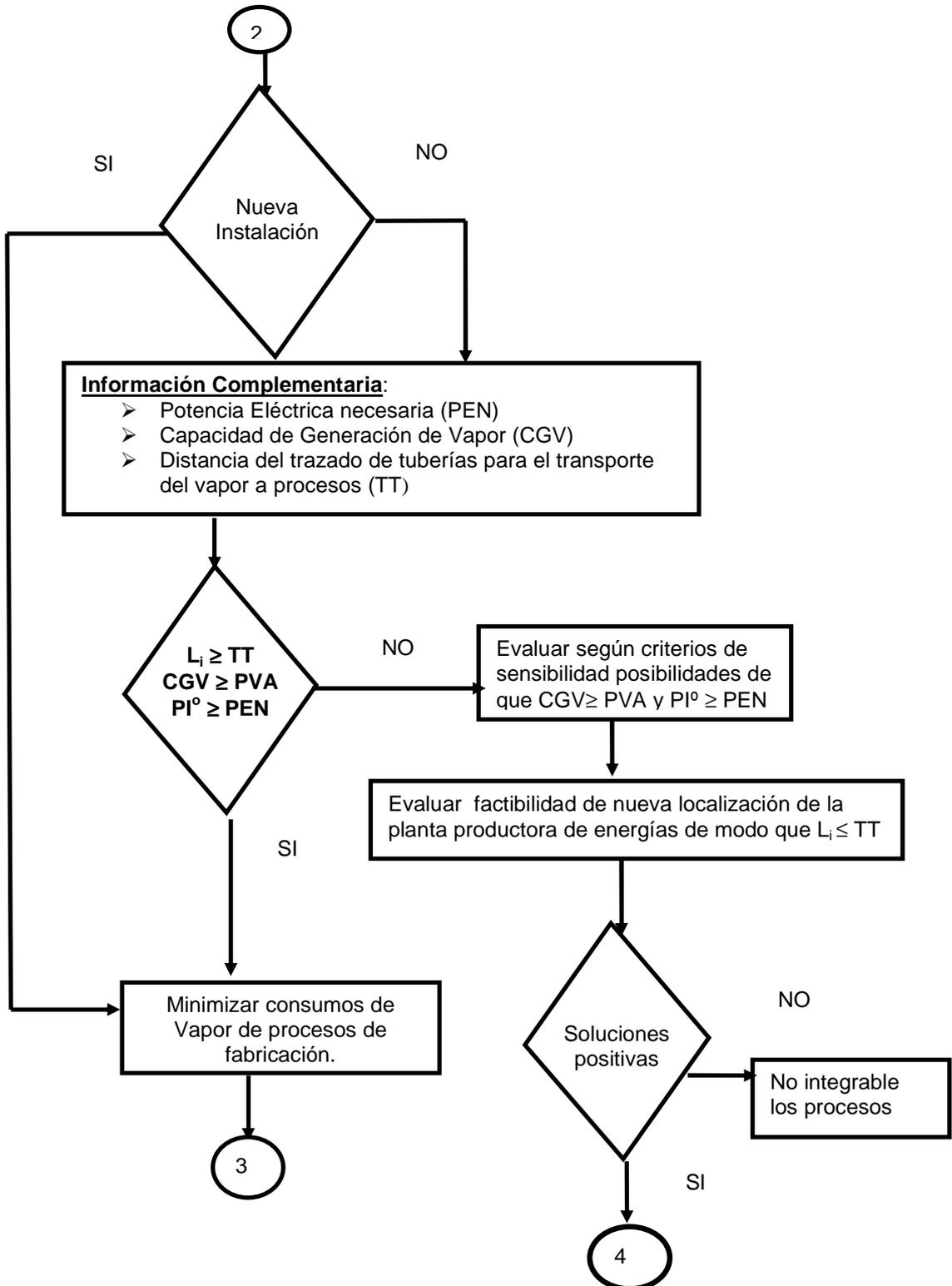
PCN = Cantidad de paja en la caña nueva.

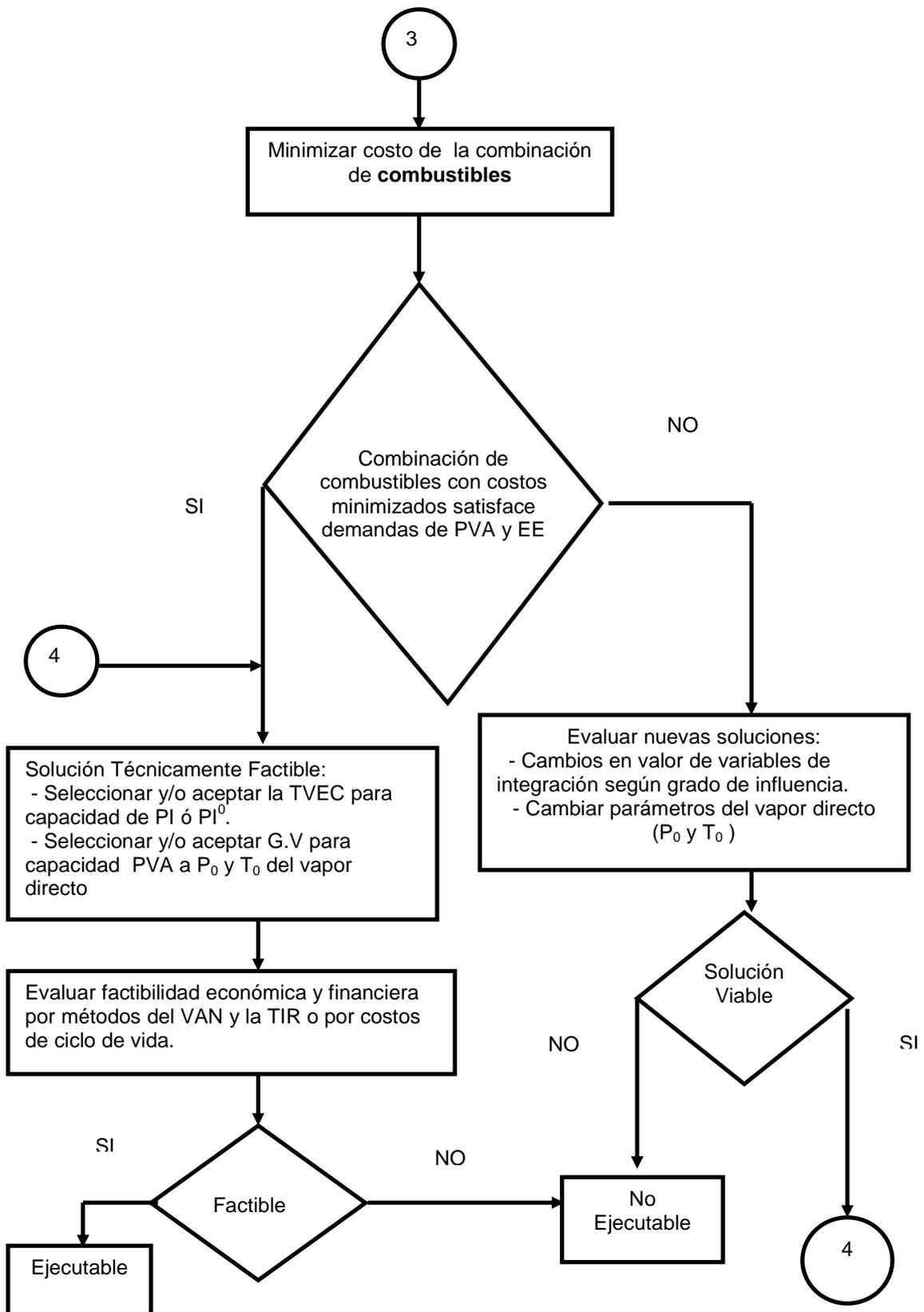
Las magnitudes CQ, PQ, CN y PCN se expresan en tanto por uno del total de caña procesada (CP) de acuerdo con reportes de laboratorio de control de los centros de acopio y limpieza.

Estimado de petróleo combustible, es la cantidad de petróleo, expresado en % (entre 25% y 80%), que con relación a la mezcla de bagazo, médula y paja de caña es posible utilizar como combustible en la producción de vapor para suplir déficit de biomásas.

Figura 2 Método de integración propuesto.







#### 4. Cálculo de las Variables de Decisión.

Estas variables son función directa de las variables de integración y se calculan según los modelos matemáticos que se muestran (TEOA; PVA; EE; PI), desarrollados para estos fines [9] donde solo es necesario recalculer la potencia a instalar (PI) y la energía eléctrica a producir (EE) cuando la presión ( $P_0$ ) y la temperatura ( $T_0$ ) iniciales del vapor son diferentes de 1,8 MPa y 320 °C.

Con el modelo de tiempo efectivo de operación anual (TEOA) se determina cuantas horas al año el sistema integrado es capaz de satisfacer las demandas de energía térmica y eléctrica.

$$\begin{aligned} \text{TEOA} = & 11137.122 - 1.180E^{-8} M^2 - 7.964 \text{ TEOZ} + 1.522E^{-3} \\ & \text{TEOZ}^2 + 40.493 \text{ FP} + 113.597 \text{ HB} - 7.753E^{-2} \text{ CM} - 1.191 \text{ UCC} \\ & ^2 + 6.464E^{-6} M^* \text{TEOZ} - 1.214E^{-4} M^* \text{HB} - 4.369E^{-8} M^* \text{CPC} + \\ & 9.219E^{-8} M^* \text{CM} + 9.988E^{-5} M^* \text{UCC} - 1.956E^{-2} \text{ TEOZ}^* \text{FP} - 3.062 \\ & E^{-2} \text{ TEOZ}^* \text{HB} + 1.809E^{-5} \text{ TEOZ}^* \text{CPC} + 4.709E^{-2} \text{ TEOZ}^* \text{UCC} - \\ & 0.230 \text{ FP}^* \text{UCC} + 3.915E^{-4} \text{ CPC} * \text{UCC}. \end{aligned} \quad (4)$$

El modelo producción de vapor anual (PVA) expresa cuanta cantidad de vapor, para satisfacer las demandas de los procesos integrados es posible producir en el período de un año, cuando las variables de integración alcancen determinado valor en el rango definido para el estudio.

$$\begin{aligned} \text{PVA} = & 619964.263 - 607.411 \text{ TEOZ} + 0.106 \text{ TEOZ}^2 + \\ & 9610.777 \text{ HB} + 9.932E^{-4} \text{ CPC}^2 - 97.712 \text{ UCC}^2 + 7.201E^{-4} \\ & M^* \text{TEOZ} - 1.23E^{-2} M^* \text{HB} - 5.331E^{-5} M^* \text{CPC} + 1.268E^{-2} M^* \text{UCC} - \\ & 1.097 \text{ TEOZ}^* \text{FP} - 2.840 \text{ TEOZ}^* \text{HB} + 1.042E^{-3} \text{ TEOZ}^* \text{CPC} + \\ & 2.979 \text{ TEOZ}^* \text{UCC} + 44.411 \text{ FP}^* \text{HB} - 14.432 \text{ FP}^* \text{UCC} - 4.532E^{-2} \\ & \text{HB}^* \text{CM} + 2.605E^{-2} \text{ CPC}^* \text{UCC} \end{aligned} \quad (5)$$

Representa el modelo de Energía Eléctrica (EE) la cantidad de ella que en el período de un año se puede producir por el sistema energético con los procesos integrados (MWh/año), en dependencia de los valores de las variables de integración y cuando los valores de los parámetros iniciales del vapor, es decir la presión y la temperatura, tienen valor de 1,8 MPa y 320 °C respectivamente.

$$\begin{aligned} \text{EE} = & 265219.265 - 0.374M + 1.994E^{-7} M^2 - 145.996 \text{ TEOZ} + \\ & 1.674E^{-2} \text{ TEOZ}^2 + 3069.597 \text{ FP} + 6.281 \text{ FP}^2 + 9.047E^{-5} \text{ CPC}^2 - \\ & 6.401 \text{ CM} - 863.821 \text{ UCC} - 15.843 \text{ UCC}^2 + 1.824E^{-4} M^* \text{TEOZ} - \\ & 3.166E^{-3} M^* \text{FP} - 1.978E^{-3} M^* \text{HB} - 4.332E^{-6} M^* \text{CPC} + 5.012E^{-6} \\ & M^* \text{CM} + 3.444E^{-3} M^* \text{UCC} - 1.088 \text{ TEOZ}^* \text{FP} + 2.239E^{-3} \\ & \text{TEOZ}^* \text{CM} + 0.477 \text{ TEOZ}^* \text{UCC} + 15.988 \text{ FP}^* \text{HB} - 8.387E^{-3} \\ & \text{FP}^* \text{CPC} - 2.033E^{-2} \text{ FP}^* \text{CM} - 9.854 \text{ FP}^* \text{UCC} + 5.425E^{-3} \\ & \text{HB}^* \text{CPC} - 3.528E^{-2} \text{ HB}^* \text{CM} + 10.053 \text{ HB}^* \text{UCC} + 2.639E^{-5} \\ & \text{CPC}^* \text{CM} + 3.139E^{-3} \text{ CPC}^* \text{UCC} + 1.868E^{-2} \text{ CM}^* \text{UCC}. \end{aligned} \quad (6)$$

El modelo potencia a instalar (PI), permite predecir la potencia eléctrica máxima que se puede producir (MW) por el sistema en función del valor de las variables de integración y también para los parámetros del valor anteriormente indicados

$$\begin{aligned} \text{PI} = & 29.713 - 5.783E^{-5} M + 5.433E^{-11} M^2 - 1.059E^{-2} \text{ TEOZ} + \\ & 8.421E^{-7} \text{ TEOZ}^2 + 1.287E^{-8} \text{ CPC}^2 - 1.044E^{-3} \text{ UCC}^2 + 1.842E^{-8} \\ & M^* \text{TEOZ} - 2.321E^{-7} M^* \text{FP} - 2.682E^{-7} M^* \text{HB} - 5.595E^{-10} M^* \text{CPC} \\ & + 3.25E^{-7} M^* \text{UCC} - 3.622E^{-5} \text{ TEOZ}^* \text{FP} + 9.570E^{-8} \text{ TEOZ}^* \text{CM} + \\ & 3.782E^{-3} \text{ FP}^* \text{HB} - 5.865E^{-6} \text{ HB}^* \text{CM} \end{aligned} \quad (7)$$

El ajuste de los valores de EE y PI a las condiciones de presión y temperatura diferentes de 1,8 MPa y 320 °C se realiza con el empleo de un modelo de ajuste ( $\Phi$ ) desarrollado para estos efectos.

$$\Phi = 0.797322 - 0.12525 P + 0.000714349 T. \quad (8)$$

Donde:

P = Presión del vapor vivo expresado en MPa.  
T = Temperatura del vapor vivo expresado en °C.

Por tanto, la electricidad a producir en un año y la potencia a instalar cuando los parámetros del vapor son diferentes de 1,8 MPa y 320 °C será:

$$\begin{aligned} \text{EE}^0 &= \Phi * \text{EE} \\ \text{PI}^0 &= \Phi * \text{PI} \end{aligned}$$

#### 5. Minimización del consumo de vapor a procesos.

El consumo fundamental de vapor de los procesos integrados ocurre en la estación de calentamiento–evaporación–cocción del proceso de fabricación del azúcar. Se reconoce en la literatura especializada que diversas soluciones y/o estrategias pueden ser empleadas para reducir el consumo desde los cercanos 500 kgv/t de caña molida o más, hasta valores inferiores a los 350 kgv por cada tonelada en dependencia de las soluciones implementadas.

Aprovechando estas experiencias y empleando métodos de simulación de procesos a partir de los modelos clásicos reportados por la literatura sobre el efecto que producen cada una de las soluciones referidas anteriormente en el consumo de vapor de escape, se desarrollan un conjunto de ecuaciones [9] para pronosticar el consumo de vapor, según el nivel de molida de caña, para capacidades entre 167,2 a 262,8 t/h ó (350 000 a 550 000 @/día) en instalaciones de cuádruple, quíntuple y séxtuple efectos, lo que se

recomienda como referencia para la etapa de minimización del consumo de vapor de escape que el Método de Integración Energética que se propone requiere, lo que evita tener que estimarlo a partir de los índices generales reportados en la literatura.

## 6. Minimización de los costos de combustibles.

Está definido el nivel de influencia que las variables de integración, (que representan combustibles de forma directa o indirecta) tienen sobre las variables de decisión, lo que no implica que pueda descuidarse el costo asociado a la generación de energías para los procesos integrados. El planteamiento de un modelo de programación lineal [9] en el que intervienen los cuatro combustibles involucrados, asegura conocer cual es la cantidad de combustible "i" óptimo para generar determinada cantidad de energía "j" para un cierto período de tiempo entre los límites de máxima y mínima producción de vapor y energía eléctrica dadas como restricciones del problema.

## 7. Localización de la planta generadora de energías.

Una causa de inviabilidad de integración energética entre un ingenio azucarero y una fábrica de papel, puede ser la distancia que existe entre el lugar de ubicación de la Turbina de Vapor de Extracción Condensación (TVEC) y el consumidor de vapor del proceso papelerero, lo que puede ser determinado por medio de modelos matemáticos de Longitud de Integración ( $L_i$ ) desarrollados [1;2;9] para estos efectos, en función de la presión de la extracción y de la que necesita el consumidor del proceso papelerero, de manera que se satisfaga la condición ( $L_i$ ). Se ofrecen las ecuaciones para los diferentes niveles de presión del consumidor expresadas en MPa.

## 8. Factibilidad de los escenarios de integración.

$$L_{(ps = 0.4)} = - 4915,08 + 3549,43 * Pe - 509,941 * \rho - 687,202 * G + 49970,3 * Di.$$

$$L_{(ps = 0.5)} = - 4635,02 + 3255,86 * Pe - 421,13 * \rho - 640,163 * G + 44829,5 * Di.$$

$$L_{(ps = 0.6)} = - 4354,62 + 2961,89 * Pe - 332,236 * \rho - 593,084 * G + 39685,9 * Di.$$

$$L_{(ps = 0.7)} = - 4074,34 + 2668,04 * Pe - 243,364 * \rho - 546,02 * G + 34543,2 * Di.$$

$$L_{(ps = 0.8)} = - 3794,26 + 2374,14 * Pe - 154,468 * \rho - 498,95 * G + 29401,4 * Di.$$

$$L_{(ps = 0.9)} = - 3514,07 + 2080,26 * Pe - 65,5858 * \rho - 451,884 * G + 24259,1 * Di.$$

$$L_{(ps = 1.0)} = - 3233,91 + 1786,42 * Pe + 23,292 * \rho - 404,821 * G + 19117,1 * Di.$$

A partir de los diferentes escenarios de integración que se producen, dado por el rango de variación de las variables de integración y el valor de la presión ( $P_0$ ) y la temperatura ( $T_0$ ) del vapor directo, el método ofrece la posibilidad de seleccionar la turbina de vapor de extracción condensación (TVEC) y la unidad generadora de vapor (GV) necesarios, tomando como base para ello las respectivas capacidades, expresadas por las variables de decisión producción de vapor anual (PVA) y la potencia a instalar (PI ó  $PI^0$ ), así como también la presión y temperatura del vapor directo con que debe operar el sistema energético para satisfacer las demandas de los procesos integrados.

La factibilidad económica-financiera de los escenarios de integración técnicamente viable, deben ser evaluadas por las técnicas del VAN, la TIR o mediante un análisis del costo del ciclo de vida, en dependencia de la disponibilidad de información y las características particulares del escenario.

## 9. Conclusiones.

1. El método de integración energética, cuyas definiciones, procedimientos y ecuaciones se han desarrollado, permite generar escenarios de las diferentes alternativas a evaluar técnica y económicamente para determinar la factibilidad de integrar energéticamente los procesos estudiados, lo que constituye un importante aporte al desarrollo de esta rama de la economía.

2. El método propuesto, constituye un procedimiento factible para la integración de la industria azucarera con otros procesos en el marco de la diversificación de la misma, por lo que dicho resultado aporta el elemento metodológico para el desarrollo de los estudios y aplicaciones de la diversificación de dicha industria, planteados en la política estratégica y de desarrollo científico del MINAZ. Este aporte también tiene un valor social en el sentido de disponer a estas industrias en situaciones de competencia en el marco de la economía nacional, favoreciendo la generación de empleos y su desarrollo.



## 10. Bibliografía.

1. Balbis Morejón, Milén. Modelación matemática de las principales variables de integración energética entre ingenios azucareros y otros procesos consumidores de energía vecinos. Universidad de Cienfuegos, 2000, 97 h, Trabajo de Diploma. M.Sc. Juan F Puerta Fernández (tutor).
2. Balbis Morejón, Milén; Puerta Fernández, Juan F.; Santana, Roberto; Castellanos Álvarez, Juan A. Software para el cálculo y selección de tuberías utilizadas en la integración energética. Revista Centro Azúcar, (aprobado para publicar año 2002).
3. Castellanos Álvarez, Juan A. Análisis de alternativas del esquema de evaporación, calentamiento y cocción de un Central Azucarero que entrega Energía Eléctrica y Bagazo a Fábrica de Papel. Villa Clara: Universidad Central de las Villas, 1990. 100 h. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Dr. Vicente González Rodríguez, Tutor.
4. Puerta Fernández, Juan Francisco: Análisis de alternativas de integración energética del central Guillermo Moncada y la Empresa papelera Damují, Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos, 1997, 92 h, Tesis en opción del grado científico de Master en ciencias de la eficiencia energética y el diseño térmico. Juan A. Castellanos Álvarez (Tutor)
5. Puerta Fernández, Juan Francisco; Castellanos Álvarez, Juan A; González Pérez, Félix. Análisis de alternativas de integración energética de un ingenio de producción de azúcar crudo con una fábrica de papel.(Primera parte). Revista Centro Azúcar, N<sup>ro</sup> 4 , 2001, p 16-21
6. Puerta Fernández, Juan Francisco; Castellanos Álvarez, Juan A; González Pérez, Félix Análisis de alternativas de integración energética de un ingenio de producción de azúcar crudo con una fábrica de papel.(Segunda parte). Revista Centro Azúcar N<sup>ro</sup>. 1, 2002, p 26.
7. Puerta Fernández, Juan Francisco; Castellanos Álvarez, Juan A.; Arbelo de la Barca, Allán; González Pérez, Félix. Selección de Alternativas de Integración Energética entre un Ingenio azucarero y una Fábrica de Papel. Revista Centro Azúcar. Revista Centro Azúcar, (Aprobado para publicar año 2002).
8. Puerta Fernández, Juan Francisco; Álvarez-Guerra Plasencia, Mario. Software para la simulación de Turbinas de Vapor de extracción condensación. Revista Centro Azúcar , N<sup>ro</sup> 1, 1997, p 53-59.
9. Puerta Fernández, Juan Francisco. Integración Energética entre los procesos de producción de Azúcar Crudo, Pulpa y Papel de Bagazo. Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos, 2002, 114 h, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Juan A. Castellanos Álvarez (Tutor).

---

## Method analysis for making energetic integration studies between crude sugar process and pulp of bagasse and paper.

### Abstract

In the article a heuristic method for making Energetic Integration study between crude Sugar process, pulp of bagasse and paper process is proposed. It is possible to generate scene for the integration of the processes by using specially designated regression equations, in the way that will satisfy demand of the electric power and heat generation the whole year.

**Key words:** Energetic integration, process integration.