

COMBINACIÓN DE COMBUSTIBLES EN SISTEMAS DE CO-COMBUSTIÓN PARA PROCESOS ENERGÉTICAMENTE INTEGRADOS

**Juan Francisco Puerta Fernández, Juan A. Castellanos Álvarez,
Félix González Pérez.
Universidad de Cienfuegos**

Recibido: Febrero/2006

Aceptado: Marzo/2006

En el artículo se ofrece un análisis de diferentes alternativas de suministro de combustible para suplir las necesidades de calor y electricidad en un proceso. Como método para el análisis se emplea una combinación del método de programación lineal con el de análisis de regresión múltiple y la herramienta Solver del paquete profesional Excel, determinándose la combinación menos costosa de una mezcla de cuatro combustibles para un sistema energéticamente integrado de fabricación de azúcar crudo, pulpa y papel de bagazo de caña. Los resultados a que se arriban demuestran que, no siempre, la solución óptima es la vía racional para satisfacer la demanda y como alternativa el costo a pagar por la solución razonablemente más ventajosa.

Palabras clave: Integración energética, programación lineal, diversificación azucarera, análisis de regresión.

FUEL COMBINATION IN CO-COMBUSTION SYSTEMS FOR INTEGRATED ENERGETIC PROCESSES

This paper offers an analysis of different alternatives of supply of fuel to replace the necessities of heat and electricity in a process. As method for the analysis it has been used a combination of lineal programming method with an analysis of multiple regression and the Solver tool of the professional software Excel, being determined the less expensive combination of a mixture of four fuels for a energetically integrated system of production of raw sugar, pulp and paper of cane trash. The results arrives to demonstrate that the good solution is not always the rational way of satisfying the demand and as alternative the cost to pay reasonably for the solution but advantageous.

Key words: Energy integration, lineal programming, sugar mill diversification, regression analysis.

INTRODUCCIÓN

La programación lineal es una técnica matemática para determinar, entre otras, la combinación óptima de recursos que desde sus inicios fue aplicada a los problemas de macrolocalización de

plantas y problemas de transporte, extendiéndose su utilización también hacia la determinación de la mezcla óptima de ingredientes de modo que se elevaran al máximo las utilidades o se reducirán al mínimo los costos.

(*) E-mail: jfpuerta@fmec.ucf.edu.cu

Tomando en cuenta las características de consumo de energía de los procesos de fabricación de azúcar crudo y de producción de pulpa y papel de bagazo y la dependencia que por medio del bagazo tienen, así como las potencialidades de uso de los residuos cañeros como combustible en los ingenios azucareros, entre otros elementos, se ha propuesto un método y otros criterios⁵ para integrar energéticamente estos procesos en el que se emplean cuatro tipos diferentes de materiales combustibles, con lo que se satisface la producción de calor y de energía eléctrica todo el año y se reduce la componente energética de costo respecto a los procesos separados.

El método de programación lineal, en este caso, ha sido aplicado con el objetivo de despejar los posibles escenarios de co-combustión, es decir, determinar las múltiples proporciones que de una mezcla de cuatro combustibles se pueden emplear, para producir la energía térmica y eléctrica que a lo largo de un año demandarían los procesos de fabricación de azúcar crudo, pulpa y papel de bagazo al menor costo posible.

DESARROLLO

Las demandas de energía que estos procesos integrados requieren, han sido determinadas a partir de los balances de materiales y energía, mediciones directas en los procesos e índices fundamentales. Con el empleo de las modernas técnicas de simulación fue posible pronosticar dichas necesidades energéticas para situaciones en que las cantidades de caña a procesar varían entre 166 y 237 t/h (350 000 y 500 000 @/d) y la producción de papel anual puede llegar hasta 30 000 t.

La determinación de las cantidades de combustibles en la mezcla se resuelve mediante el planteamiento del modelo de programación lineal siguiente:

- Función Objetivo:

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^4 C_i * X_i$$

- Sistema de restricciones:

$$PVA^{\text{máx}} \geq k_1 + a_1 * CB + a_2 * CC + a_3 * CM + a_4 * CP \geq PVA^{\text{mín}}$$

$$EE^{\text{máx}} \geq k_2 + b_1 * CB + b_2 * CC - b_3 * CM + b_4 * CP \geq EE^{\text{mín}}$$

Donde:

X_i = Cantidad de combustible del tipo "i" que se emplea en la mezcla, bagazo de caña (CB), médula del bagazo (CM) que se extrae durante la preparación en el proceso papelerero, paja de caña (CP) del proceso de cosecha de la caña que se muele en el ingenio y petróleo (CC).

PVA y EE = Límites máximo y mínimo de las restricciones que coinciden con la cantidad de vapor que demandan los procesos integrados (PVA) y la cantidad de energía eléctrica (EE) que se puede producir en estos procesos integrados, ambas, determinadas en estudio realizado por el autor⁵ para lo cual obtuvo las ecuaciones de regresión correspondientes.

Los valores límites de las variables de decisión son:

$$PVA^{\text{mín}} = 364\,728 \text{ t/año.}$$

$$EE^{\text{mín}} = 45\,918,6 \text{ MWh/año}$$

$$PVA^{\text{máx}} = 881\,803 \text{ t/año.}$$

$$EE^{\text{máx}} = 11\,5462,5 \text{ MWh/año}$$

C_i = Costo de los combustibles del tipo "i" que se emplean en la mezcla.

- Paja de caña combustible = 10,29 USD/t, determinado por Castillo Coto (1) con límites optimista y pesimista de 10,83 y 15,22 USD/t, respectivamente
- El bagazo de la caña destinado al uso como combustible está valorado entre 13,3 y 21,3 USD/t .
- Para la médula del bagazo se estimarán precios similares a los fijados para el bagazo.
- Petróleo: en el momento del estudio el precio varía entre 172,9 y 265,89 USD/t (24 USD/barril).

- Los coeficientes a_1 y b_1 y las constantes k_1 y k_2 que aparecen en las inecuaciones fijan las condiciones de restricción con valores determinados por el autor⁵ en función de la dependencia que existe entre los combustibles en la mezcla y las variables PVA y EE con niveles de confiabilidad del 99 % y valores de R^2 corregidas de 90,5 % para la de PVA y de 90,2 % para la EE.
- Los valores de los coeficientes y las constantes aparecen a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Valor de los coeficientes y las constantes

Coefficientes	PVA	EE	Coefficientes	PVA	EE
k1	16 697,7		b2		0,304966
k2		13 353,0	a3	2,26242	
a1	0,988666		b3		0,26741
b1		0,0691351	a4	17,8397	
a2	2,08545		b4		2,43074

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a la gran diferencia que existe entre el precio del petróleo y el resto de los combustibles, la solución a este problema mediante programación lineal y simulación, para los menores precios, ha resultado en que lo menos costoso (3 222 176,69 USD/t) es mantener en el límite inferior de la disponibilidad el consumo de bagazo, médula y petróleo y consumir paja de caña hasta alcanzar el 52 % de la disponibilidad máxima. Esta solución tiene varios inconvenientes:

- En primer lugar no se justifica concebir un sistema de este tipo en el que hayan excedentes de bagazo y médula y tener que consumir paja de caña, que por el grado de implementación de la tecnología en cuestión, genera niveles de incertidumbre de consideración. Por otro lado, los niveles de producción de vapor (PVA) no pueden superar la demanda mínima, aunque puede generarse energía eléctrica en un 10 % mayor que la menor demanda anual, o sea, hasta un 43,9 % del límite superior de la necesidad de esta última.
- Si se concibe el sistema generador de energía, de manera que se consuman totalmente las disponibilidades de bagazo y médula, para satisfacer cierta cantidad de la energía que pueden demandar los procesos integrados, de acuerdo con el rango en que varían los precios

de los combustibles, la solución requiere consumir adicionalmente el 40 % de la disponibilidad de paja de caña, además de la menor disponibilidad de petróleo fijada entre las restricciones del problema que se soluciona, pero el costo mínimo variará entre 5 024 330,13 y 7 846 723,69 USD/año, es decir entre 1,56 y 2,44 veces mayor que la solución menos costosa, pero no se podrá producir más que la energía eléctrica mínima que requieren los procesos integrados, mientras la producción de vapor puede ser superior en un 26 % al límite inferior de la demanda, es decir el 52,3 % de la máxima demanda de vapor anual (PVA).

Tanto la solución de menor costo, como la solución para el consumo total de las disponibilidades de bagazo y médula, están limitadas a satisfacer, solo para una forma de la demanda de energía, niveles superiores a la menor necesidad, sin embargo, otras combinaciones de combustibles también estudiadas⁵ como soluciones de costo mínimo, aunque con costos superiores en todos los casos a los discutidos hasta ahora, tienen solución y pueden satisfacer los requerimientos de ambas formas de la energía a niveles que superan el 50 % y hasta el 60 % de las máximas demandas.

En la tabla 2 se puede apreciar el nivel de satisfacción de las demandas con respecto a los

límites superiores, así como sus costos asociados, según el precio del combustible, en los casos en que sólo uno de ellos sea totalmente consumido mientras los otros se consumen al nivel del límite inferior, fijado en las restricciones del problema de programación lineal planteado.

Tabla 2. Soluciones con otras combinaciones de combustibles

	Consumo de combustibles en límite superior			
	PC	CM	CB	CC
Costo Asociado (USD/año)	3 373 440,31	3 453 503,59	4 830 878,19	13 724 987,23
	5 165 718,23	5 323 609,97	7 529 480,57	21 104 361,23
PVA (%)	69,6	45,8	59,4	55,7
EE (%)	73,3	39,9	51,5	60,0

CONCLUSIONES

1. El empleo combinado de los métodos de programación lineal y el análisis de regresión con el uso de la herramienta Solver del Excel se presenta como el método idóneo para determinar la combinación de combustibles que a los costos más bajos posibles pueda satisfacer las demandas de energía eléctrica y térmica de los procesos de fabricación de azúcar y la producción de pulpa y papel de bagazo energéticamente integrados.
2. El método que se propone ofrece la posibilidad de generación y manejo de las alternativas para la producción de azúcar crudo de caña, papel de bagazo y electricidad sobre la base del menor costo energético.
3. Los análisis demuestran que la solución óptima de la combinación de los combustibles no siempre es la decisión razonablemente más ventajosa para la diversificación de la producción azucarera, teniendo un peso importante en ello los requerimientos tecnológicos.

2. Knudsen González, José y Angel R. Rubio González: “Evaluación técnico-económica de transportación de los residuos agrícolas cañeros de la Industria Azucarera Cubana”. *Centro Azúcar* (3): 55-58, 1998.
3. Puerta Fernández, Juan Francisco; Juan A. Castellanos Álvarez y Félix González Pérez: “Análisis de alternativas de integración energética de un ingenio de producción de azúcar crudo con una fábrica de papel. (Primera parte)”, *Centro Azúcar* (4): 16-21, 2001.
4. _____: “Análisis de alternativas de integración energética de un ingenio de producción de azúcar crudo con una fábrica de papel (Segunda parte)”, *Centro Azúcar*, (1): 26, 2002.
5. Puerta Fernández, Juan Francisco: Integración energética entre los procesos de producción de azúcar crudo, pulpa y papel de bagazo. Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Técnicas, Cienfuegos, Cuba, 2002.
6. Rubio González, Ángel y Félix Pérez Egusquiza: “Actualidad del empleo del combustible de los residuos agrícolas cañeros en Cuba”. *International Sugar Journal* (1219): 367-371, 2000.

BIBLIOGRAFIA

1. Castillo Coto, Ana Lilia: Enfoque prospectivo para definir la estrategia logística de la cogeneración con paja en la Industria de la caña de Azúcar. Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara, Cuba, 1999.