

## **Análisis Termodinámico de un Sistema de Cogeneración con Gasificación del Licor Negro**

**Paulo R. Santos, Francine M. Fábrega y José Vicente H. d'Angelo\***

Universidad Estatal de Campinas-UNICAMP, Facultad de Ingeniería Química, Departamento de Ingeniería de Sistemas Químicos, Caixa Postal 6066, 13083-970 Campinas-SP-Brasil  
(e-mail: dangelo@feq.unicamp.br)

\* autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

---

### **Resumen**

Se presenta el análisis termodinámico de un proceso de cogeneración de energía con gasificación del licor negro, utilizando balances de exergía para identificar y cuantificar las principales irreversibilidades presentes. Se realizó una simulación del proceso de cogeneración con un simulador comercial, a partir de la cual fue posible realizar el balance de exergía del sistema. Se evaluó la influencia de la composición de los gases obtenidos en el gasificador sobre las pérdidas exergéticas en el proceso. Las condiciones operacionales del gasificador de licor negro que contribuyen a reducir la concentración de estos compuestos responsables de las pérdidas de exergía, son la baja temperatura (700°C) y la baja presión (200 kPa). El análisis mostró útil para determinar de viabilidad técnica del proceso alternativo de generación de energía a través de la gasificación del licor negro.

*Palabras clave: exergía, cogeneración, licor negro, gasificación, simulación*

## **Thermodynamic Analysis of a Cogeneration System with Black Liquor Gasification**

### **Abstract**

This work presents a thermodynamic analysis of a cogeneration energy process with black liquor gasification obtained in pulp and paper industries, using exergy balances to identify and quantify the main irreversibilities in the process. The cogeneration process was analyzed using a commercial simulator from which it was possible to develop the exergy balance. The influence of the composition of the gases produced in the gasifier over the exergy losses in the process was evaluated. The most appropriated operating conditions in the gasifier to reduce the concentration of these components, which are responsible for the exergy losses are the low temperature (700 °C) and the low pressure (200 kPa). The analysis showed to be useful to determine the technical viability of this alternative process of energy generation using black liquor gasification.

*Keywords: exergy, cogeneration, black liquor, gasification, simulation*

## INTRODUCCIÓN

Las industrias brasileñas de papel y celulosa viven una fase de expansión de sus procesos productivos. Las inversiones realizadas por el sector en los últimos años permitieron el desarrollo tecnológico de procesos y la generación de productos de mayor valor agregado y, al mismo tiempo, una mejoría de la calidad ambiental de sus fábricas y de sus efluentes. En los últimos diez años, las industrias brasileñas invirtieron US\$ 12 mil millones en la ampliación de su capacidad productiva. Estas inversiones permitieron que el Brasil se convirtiera en el mayor productor mundial de celulosa de fibra corta del mercado, con una producción que aumentó de 1,4 a 6,0 millones de toneladas/año, superando a los Estados Unidos en este tipo de celulosa. En 2005, las exportaciones de celulosa y papel, participando activamente del comercio globalizado, registraron un valor total de aproximadamente US\$ 3.5 mil millones, un crecimiento de 18.6% en relación al año anterior. Estos números reflejan las inversiones hechas y la entrada en operación de nuevas capacidades instaladas (Bracelpa, 2006). El sector genera internamente una gran parte de la energía consumida en sus procesos por la quema de dos combustibles: biomasa (virutas de madera) y licor negro, que es la principal fuente de energía, proveniente del proceso de digestión de la madera y constituido de materiales inorgánicos y orgánicos, principalmente lignina (Gullichsen y Paulapuro, 2000).

Debido al aumento de la capacidad productiva de las industrias, es generada una gran cantidad de licor negro, creándose cuellos de botella en el proceso de recuperación de los reactivos químicos (evaporación y caldera de recuperación). La reducida flexibilidad de operación de las calderas de recuperación, junto con problemas de corrosión, incrustación, explosión, olor y emisiones, son algunos factores que motivan la investigación de sistemas alternativos de generación de energía. Otro factor de relevancia es el tiempo de vida útil de esas calderas, alrededor de 30 a 35 años. Debido a esos hechos, existe una motivación creciente para una eventual sustitución de las calderas de recuperación por procesos alternativos, entre los cuales se destaca la gasificación de licor negro, por las siguientes razones: posibilidad de reducción en la carga de los evaporadores (debido a que se utiliza una concentración menor del licor negro); menor costo de inversión comparado con la caldera de recuperación (Consonni *et al.*, 1998); menor riesgo de explosión y corrosión, debido a la ausencia de tuberías; reducción en la emisión de los gases; y mayor potencia producida.

El proceso de gasificación consiste en la oxidación parcial de las sustancias orgánicas contenidas en el licor negro. El gasificador puede ser clasificado de acuerdo con el nivel de presión de operación (atmosférica o presurizada), con el nivel de temperatura (alta o baja), además del tipo de agente oxidante utilizado en el proceso (aire, oxígeno o vapor de agua). Las combinaciones de esas características especifican el tipo de proyecto, y también influyen en la composición del gas generado en el gasificador, la cual depende también de la composición del licor negro utilizado.

Varios estudios (Ihrén, 1994; Näsholm y Westermarck, 1997; Larson *et al.*, 2000 y Larson *et al.*, 2003) fueron realizados sobre esos sistemas alternativos de generación de energía. Consonni *et al.* (1998), realizaron un estudio comparativo entre el sistema convencional de generación y tres ciclos BLGCC (Black Liquor Gasifier Combined Cycle). Estudios recientes, como los de Burciaga (2006), Dahlquist y Jones (2006), Nong *et al.* (2006), Lindblom y Landalv (2006), Consonni *et al.* (2004) y McKeough (2004), muestran que la tecnología de gasificación de licor negro se consolida cada vez más, para, en un futuro próximo, tornarse una alternativa viable para el procesamiento del licor negro excedente, evitando los actuales embotellamientos existentes en el sector de recuperación de las industrias de papel y celulosa.

El presente trabajo tuvo como objetivo realizar un análisis termodinámico de un sistema de cogeneración con gasificación de licor negro, evaluando las pérdidas exergéticas en el ciclo de cogeneración, utilizando las configuraciones propuestas por Consonni *et al.* (1998), considerando también diferentes composiciones para los gases generados en el gasificador.

## METODOLOGIA

Entre varios trabajos analizados que abordaban ciclos de generación con gasificación de licor negro, se optó por el trabajo de Consonni *et al.* (1998) como base para el estudio realizado, ya que mostró

ser el más completo y detallado, presentando los datos necesarios para la simulación del proceso de cogeneración. Estos autores estudiaron la simulación de sistemas de cogeneración usando tres ciclos de cogeneración diferentes en función de tres gasificadores con características operacionales distintas: aire a 200 kPa y 700 °C; aire a 2500 kPa y 950 °C y oxígeno a 2500 kPa y rango de 1000 a 1400 °C, y las compararon con el ciclo convencional con caldera de recuperación Tomlinson. De estas tres configuraciones, la que utilizó el gasificador operando a 200 kPa y 700 °C fue seleccionada para ser estudiada detalladamente en este trabajo, por haber sido ésta la configuración que presentó mejor eficiencia termodinámica (de primera y segunda ley).

El proceso está compuesto por un gasificador, que es alimentado con licor negro y aire; los gases generados son transportados para una serie de intercambiadores de calor y un lavador para la remoción de H<sub>2</sub>S. Enseguida pasan por un compresor y luego son enviados a una cámara de combustión, la cual también es alimentada con una corriente de aire, proveniente de un sistema de compresores accionados por dos turbinas. Los gases originales son quemados en la cámara de combustión, y los gases de combustión generados son enviados a dos turbinas, generando energía eléctrica, y finalmente, a una caldera para generación de vapor. La Figura 1 muestra un detalle mayor de las corrientes y equipamientos involucrados. El ciclo de gasificación/cogeneración fue implementado en un simulador comercial, Hysys© 2.2 (Hyprotech) y está descrito detalladamente en Santos (2007), utilizando datos de Consonni *et al.* (1998) y de Gallego (2004).

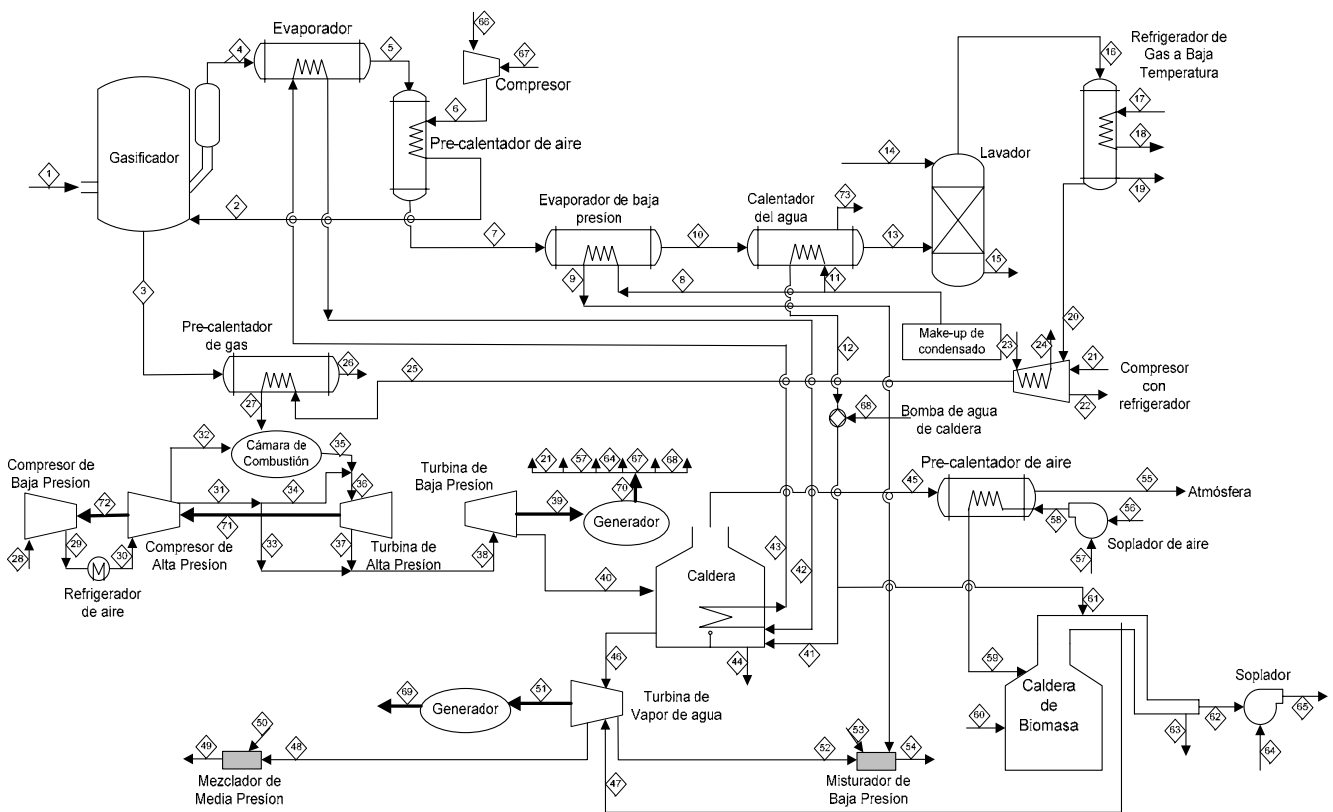


Fig. 1: Diagrama de flujo del sistema de cogeneración analizado.

Después de la implementación del proceso en el simulador comercial, fueron analizadas las pérdidas exergéticas del ciclo de cogeneración, combinando diferentes condiciones operacionales, evaluando también la composición de los gases generados en el gasificador. La utilización de esta metodología permitirá evaluar si el licor negro de eucalipto genera un producto gaseoso (con una composición adecuada para ser usado en el ciclo de cogeneración) mejor que el generado por la gasificación del licor de pino.

### Análisis Exergético del Sistema

El análisis exergético es una herramienta termodinámica, usada para analizar el desempeño de un determinado sistema desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica, identificando y cuantificando las irreversibilidades de este sistema. Sin embargo, se puede decir que se basa en un análisis de disponibilidad, cuantificando el trabajo útil teórico mínimo requerido, localizando y cuantificando las pérdidas exergéticas del sistema global o de sub-sistemas (Yumrutaş *et al.*, 2002).

La exergía no está sometida a la ley de conservación (excepto para procesos ideales, reversibles), pues puede ser disipada (“destruida”) debido a las irreversibilidades de cualquier proceso real. La disipación de la exergía durante un determinado proceso es proporcional a la entropía generada debido a las irreversibilidades. Bejan *et al.* (1996), describen que la exergía total de cualquier sistema puede ser dividida en cuatro componentes: física ( $Ex_f$ ), cinética ( $Ex_{kn}$ ), potencial ( $Ex_{pt}$ ) y química ( $Ex_q$ ). En este trabajo no fueron consideradas las exergías cinética y potencial, debido a que el sistema está en la misma altura y sin movimiento en relación al estado de referencia. La exergía física en todos los componentes del ciclo fue calculada con ayuda de una planilla electrónica, utilizando los datos obtenidos en el simulador de procesos. La exergía puede ser calculada por la Ecuación 1:

$$Ex = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (1)$$

donde:  $h$  es la entalpía molar ( $J \cdot mol^{-1}$ );  $s$  es la entropía molar ( $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ) y  $T_o$  es la temperatura absoluta del ambiente de referencia (K) y el subíndice  $o$  indica propiedades evaluadas a la temperatura y presión de referencia.

Se adoptó la hipótesis de sistema en estado estacionario y así fue utilizada la siguiente ecuación (Bejan *et al.*, 1996) para el balance de exergía, considerando un sistema con volumen de control fijo:

$$\sum_{j=1}^n \left( 1 - \frac{T_o}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_{e=1}^n (\dot{m}_e Ex_e) - \sum_{s=1}^n (\dot{m}_s Ex_s) - \dot{Ex}_D = 0 \quad (2)$$

donde:  $T_j$  es la temperatura absoluta (K) de la región  $j$ ;  $\dot{Q}_j$  representa la tasa de transferencia de calor en la región  $j$  (kJ/h);  $\dot{W}_{VC}$  es la tasa de transferencia de calor en el volumen de control (kJ/h), excluyéndose el trabajo de flujo;  $\dot{Ex}_D$  es la tasa de exergía destruida (disipada) (kJ/h); y los términos de las sumatorias restantes indican los flujos de exergía en las corrientes de entrada ( $e$ ) y salida ( $s$ ) del volumen de control (kJ/h), como base en sus caudales másicos (kg/h) y en el valor de la exergía de cada corriente (kJ/kg).

Las turbinas, compresores y bombas del ciclo fueron considerados adiabáticos, eliminando así el término de transferencia de calor. Para el combustor fue utilizada la Ecuación 2, en la cual fue calculada la exergía física en cada corriente. Las propiedades estándar de cada componente de la corriente gaseosa fueron obtenidas también del simulador Hysys© 2.2. Además en el combustor fue calculada la variación de exergía química, la cual ocurre cuando hay una diferencia de composición química del sistema en relación a las condiciones de referencia, siendo utilizada Ecuación 3 (Bejan *et al.*, 1996) para calcularla

$$Ex_q = \sum_{k=1}^n x_k Ex_{qk} + RT_o \sum_{k=1}^n x_k \ln x_k \quad (3)$$

donde:  $Ex_{qk}$  es la exergía química estándar (J/mol);  $x_k$  es la fracción molar del componente  $k$  en la corriente y  $R$  es la constante universal de los gases [ $J/(mol \cdot K)$ ].

Los valores estándar de la exergía química se basan en las condiciones de referencia, a una temperatura de 25 °C y presión de 1 atm. Las propiedades termodinámicas utilizadas para el cálculo de la variación exergética fueron obtenidas de las simulaciones hechas en el Hysys®, en las cuales se utilizó la ecuación de estado de Peng-Robinson (Reid *et al.*, 1986) para calcular las propiedades termodinámicas de cada corriente (entalpía, entropía, etc.); esta ecuación es adecuada para sistemas compuestos por hidrocarburos y gases inorgánicos. Tomando como base las ecuaciones presentadas y los valores de entalpía, entropía, composición, temperatura y presión, obtenidos en el simulador, en el cual se implementó el ciclo presentado por Consonni *et al.* (1998), fueron cuantificados los valores de las exergías de cada corriente del proceso y, a partir de esos valores, utilizando la ecuación de balance de exergía, fue posible calcular las pérdidas exergéticas en cada componente del ciclo. Los resultados obtenidos son presentados a continuación, en los cuales se analiza también la influencia de la composición de los gases provenientes del gasificador sobre las pérdidas exergéticas del ciclo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todos los cálculos para el análisis exergético del ciclo de cogeneración fueron realizados en una planilla electrónica, utilizando las ecuaciones para análisis exergético y los datos del simulador. Así, primeramente, fue realizado un análisis con cuatro configuraciones diferentes de composición de los gases, evaluándose su sensibilidad sobre las pérdidas exergéticas del ciclo de cogeneración con gasificación del licor negro. La tabla 1 muestra las cuatro configuraciones utilizadas.

Tabla 1: Composición (fracciones molares) de los gases obtenidos en un proceso de gasificación de licor negro de pino usada en las simulaciones de los ciclos.

Especies	Configuraciones			
	1	2	3	4
CH <sub>4</sub>	0.009	0.003	0.023	0.021
CO	0.116	0.250	0.105	0.230
CO <sub>2</sub>	0.124	0.169	0.114	0.185
H <sub>2</sub> O	0.130	0.275	0.176	0.315
H <sub>2</sub>	0.190	0.284	0.103	0.223
N <sub>2</sub>	0.423	0.000	0.466	0.003
H <sub>2</sub> S	0.006	0.019	0.006	0.010
T (°C)	700	900	950	1000
P (kPa)	200	200	2500	2500

Las configuraciones 1, 2 y 3 corresponden a las de Consonni *et al.* (1998) y la 4 a Berglin y Berntsson (1998). La Figura 2 muestra las pérdidas exergéticas para las turbinas, donde se puede notar la elevada pérdida de exergía de la turbina a gas de baja presión, siendo que ella genera energía térmica y eléctrica para el proceso. En la Figura 3 son presentadas las pérdidas de exergía de los compresores; en la Figura 4 se muestran las pérdidas en la caldera y en la Figura 5 las pérdidas en el pre-calentador de gas. Se observa además que la configuración 3 presenta la menor pérdida exergética de la turbina a gas de baja presión y también es la configuración de menor pérdida del conjunto de turbinas. En la Figura 6 son presentadas las pérdidas totales de las cuatro configuraciones analizadas. La configuración 3 presentó la menor pérdida exergética entre todas las otras analizadas. La composición de la configuración 1 es muy similar a la configuración 3. La diferencia principal es la mayor cantidad de agua y menor cantidad de hidrógeno (relación 3:1).

En general, el equipo que presentó mayores irreversibilidades en el proceso completo fue el combustor. Eso se debe, según Bejan *et al.* (1996), a la existencia en este sistema de tres grandes fuentes de irreversibilidades: combustión rápida y no controlada, pérdida de carga e intercambio de calor. Una manera de atenuar esa disipación exergética sería pre-calentar el aire para reducir la razón aire-combustible. Las turbinas presentaron también una gran irreversibilidad, probablemente originada por pérdidas por fricción. Tanto la bomba como el calentador de agua presentaron las menores pérdidas del proceso.

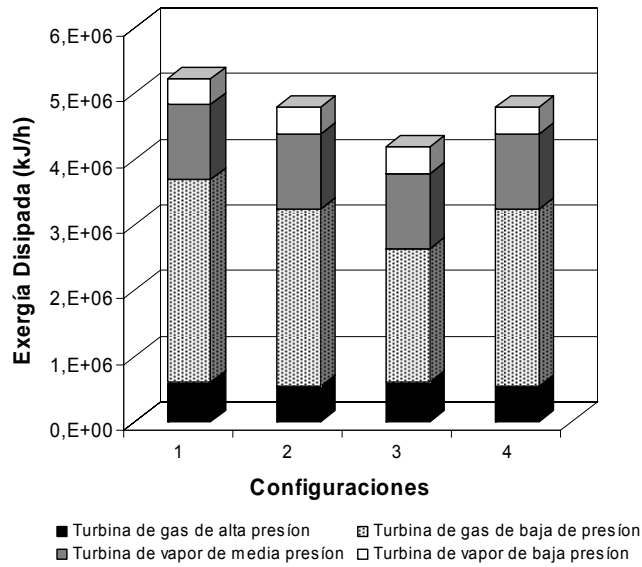


Fig. 2: Pérdidas exergéticas en las turbinas para las diferentes configuraciones.

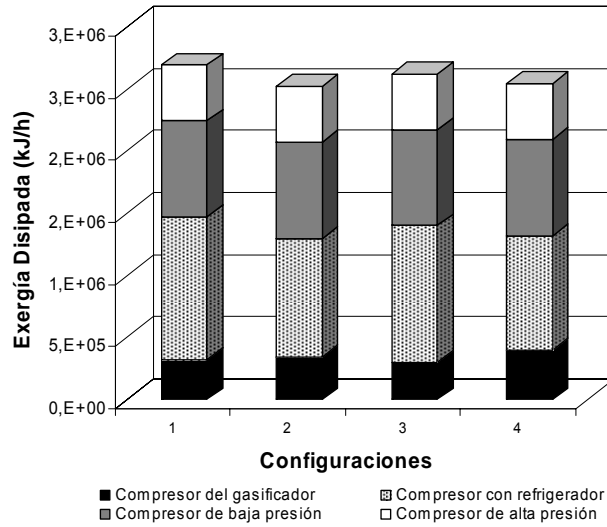


Fig. 3: Pérdidas exergéticas en los compresores para las diferentes configuraciones.

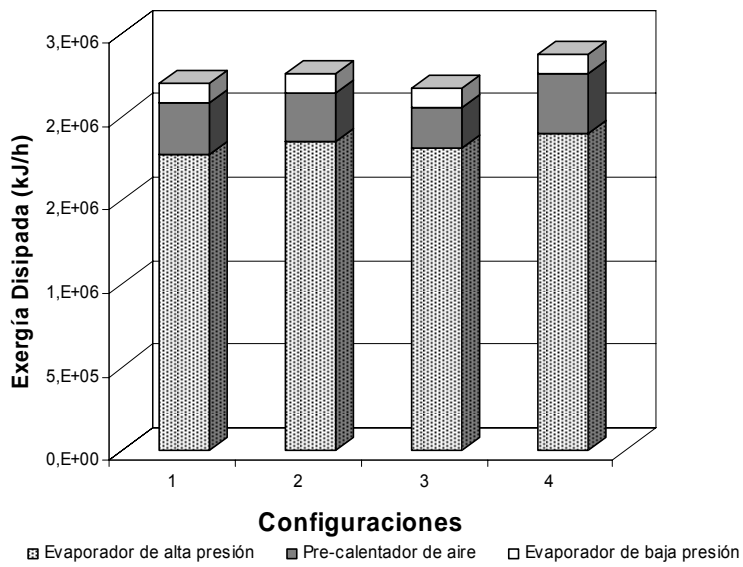


Fig. 4: Pérdidas exergéticas en los intercambiadores de calor para las diferentes configuraciones.

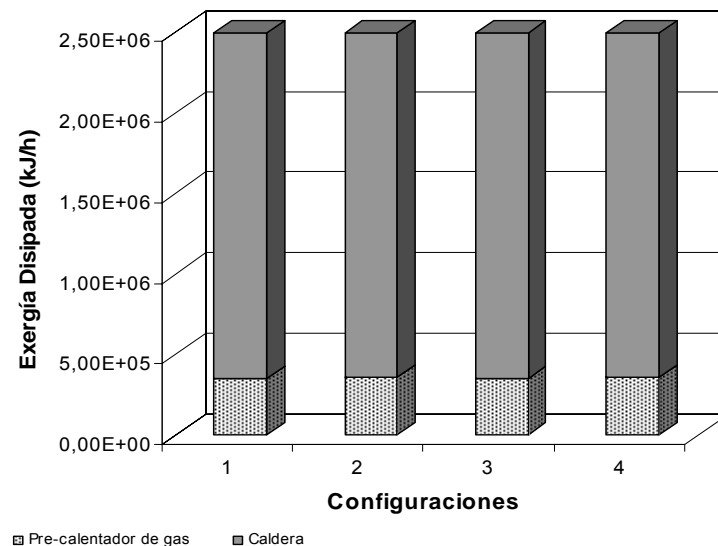


Fig. 5: Pérdidas exergéticas en la caldera y el intercambiador de calor de gas para las diferentes configuraciones.

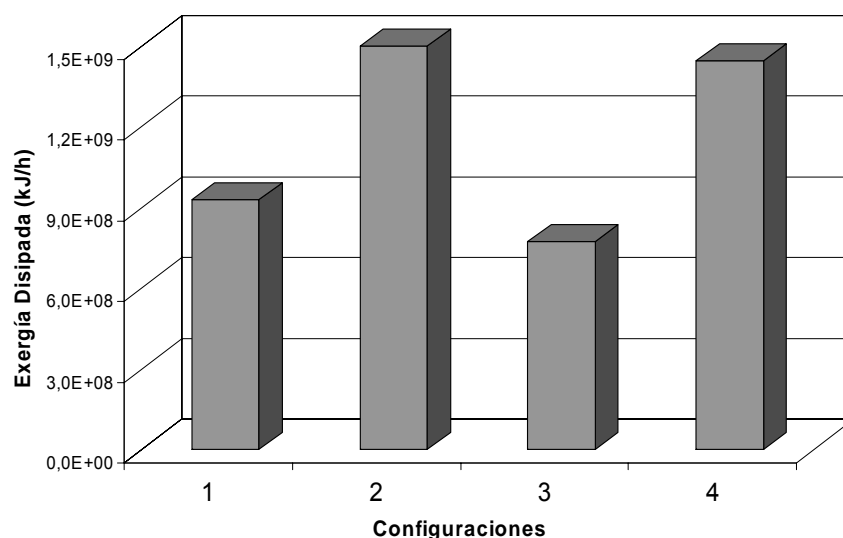


Fig. 6: Exergía disipada total para las diferentes configuraciones.

Para la configuración 3, que presentó la menor tasa de disipación de exergía. Fue efectuado un análisis de la sensibilidad de la composición de los gases efluentes del gasificador sobre las pérdidas exergéticas del sistema, lo que permitió observar que existe una gran sensibilidad en relación a la composición de hidrógeno, monóxido de carbono y agua.

Fueron propuestas seis nuevas configuraciones derivadas de la configuración 3, que fueron divididas en dos clases ( $\alpha$  y  $\beta$ ), para evaluar la influencia de la concentración de estos compuestos en la corriente gaseosa proveniente del gasificador sobre las pérdidas de exergía en el ciclo de cogeneración. En las configuraciones de la clase  $\alpha$ , el contenido de un determinado compuesto fue aumentado, mientras los otros fueron normalizados; por el contrario, en las configuraciones de la clase  $\beta$ , el contenido fue reducido, de nuevo normalizando los demás compuestos. La tabla 2 muestra las nuevas configuraciones.

La Figura 7 muestra la exergía disipada en todo el ciclo de cogeneración para las seis nuevas configuraciones. Se observó que el sistema es más sensible a la concentración de hidrógeno y de monóxido de carbono.

Tabla 2: Composición (fracciones molares) de los gases utilizada en el análisis de sensibilidad.

Componentes	Composición de gas en el análisis de la sensibilidad						
	Original #3 (Consonni <i>et al.</i> 1998)	$\alpha$			$\beta$		
		H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	CO
CH <sub>4</sub>	0.023	0.020	0.020	0.020	0.027	0.025	0.025
CO	0.105	0.093	0.090	<b>0.218</b>	0.122	0.112	<b>0.042</b>
CO <sub>2</sub>	0.114	0.102	0.099	0.100	0.134	0.123	0.123
H <sub>2</sub> O	0.176	<b>0.267</b>	0.151	0.154	<b>0.042</b>	0.188	0.188
H <sub>2</sub>	0.103	0.092	<b>0.231</b>	0.090	0.120	<b>0.043</b>	0.110
N <sub>2</sub>	0.466	0.415	0.399	0.407	0.542	0.497	0.499
H <sub>2</sub> S	0.006	0.005	0.005	0.005	0.007	0.006	0.006

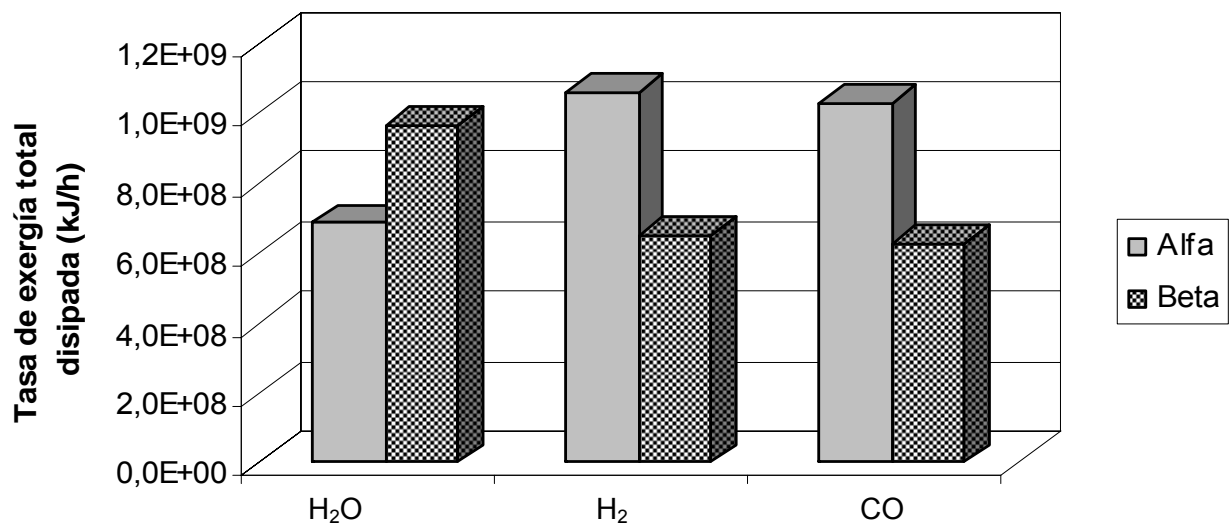


Fig. 7: Exergía disipada total para las diferentes configuraciones.

## CONCLUSIONES

Se pudo comprobar que la composición de los gases obtenidos en el gasificador influye en las pérdidas exergéticas del proceso de cogeneración. Esta composición depende de las condiciones operacionales del gasificador y también de la composición del licor negro utilizado. La configuración 3, basada en Consonni *et al.* (1998), presentó las menores pérdidas globales de exergía entre las estudiadas. Las turbinas también presentaron pérdidas exergéticas significativas, siendo la turbina a gas de baja presión la que generó mayor potencia en relación a las demás configuraciones y la que presentó las mayores tasas de exergía disipada en el proceso en todos los casos analizados.

Analizando los equipos, la cámara de combustión fue el componente del sistema de cogeneración con mayores pérdidas en el proceso. Eso se debe a la gran irreversibilidad de las relaciones químicas que ocurren en su interior. Fue realizado un análisis de sensibilidad en las composiciones de la configuración 3, que obtuvo menor pérdida de exergía, mostrando una fuerte dependencia de las cantidades de hidrógeno y monóxido de carbono.

El análisis de sensibilidad de la configuración 3 fue realizado con el propósito de identificar si algún componente específico tiene una influencia mayor sobre la cantidad de exergía disipada en el ciclo de



cogeneración. El hidrógeno y el monóxido de carbono, cuando están presentes en mayores cantidades, son responsables por grandes pérdidas, mientras que el agua contribuye para reducir las mismas.

En el diseño de futuros gasificadores de licor negro, deben ser escogidas condiciones apropiadas de operación, tales como temperatura, presión y razón aire/licor negro, de modo que pueda ser obtenida una concentración adecuada de hidrógeno y de monóxido de carbono. Por otro lado, la reducción del contenido de estos dos componentes implica en la generación de un producto gaseoso con menor poder calorífico; por lo tanto, se deben considerar estos hechos en el diseño de los gasificadores.

Ya que los estudios presentados tratan de sistemas de gasificación utilizando licor negro de pino, futuros trabajos sobre sistemas con otros tipos de licor negro, como los estudios de Cardoso *et al.* (2006) usando licor negro de eucalipto, son de fundamental importancia.

## REFERENCIAS

Bejan, A., G. Tsatsaronis y M. Moran; *Thermal Design and Optimization*, p. 30-110, John Wiley & Sons, New York, USA (1996).

Berglin, N. y T. Berntsson; *CHP in the pulp industry using black liquor gasification: thermodynamic analysis*, Applied Thermal Engineering: 18 (11), 947-961 (1998).

Bracelpa; *Relatório Informativo de 2006* – [http://www.bracelpa.org.br/br/anual/perfil\\_setor2006.pdf](http://www.bracelpa.org.br/br/anual/perfil_setor2006.pdf), São Paulo (2006).

Burciaga, D.; *Black liquor gasification: the foundation of the forest bio-refinery "new value streams"*, 2005 TAPPI Engineering Pulping, Environmental Conference – Conference Proceedings, 15 (2006).

Cardoso, M., E. D. Oliveira, M. L. Passos; *Kraft black liquor of eucalyptus for brazilian mills: chemical and physical characterization and its processing in the recovery unit*, O Papel: 67 (5), 71-83 (2006).

Consonni, S., E.D. Larson, T.G. Kreutz y N. Berglin; *Black liquor gasifier/gas turbine cogeneration*, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: 120 (3), 442-449 (1998).

Consonni, S., E.D. Larson y R. Katofsky; *An assessment of black liquor gasification combined cycles part A : Technological issues and performance comparisons*, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004: 7, 1-14 (2004).

Dahlquist, E. y A. Jones; *Presentation of a dry black liquor gasification process with direct causticization*, Tappi Journal: 5 (3), 4-8 (2006).

Gallego, A.G.; *Modelagem Computacional e Análise Termodinâmica de Sistemas de Geração de Potência utilizando Gaseificação de Licor Negro*, Tesis de Doctorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, Brasil (2004).

Gullichsen, J. y H. Paulapuro; *Paper Science Technology – Book B*, 36-134 y 303-374, Tappi Press, Jyväskylä, Finlandia (2000).

Ihrén, N.; *Optimization of black liquor gasification cogeneration systems*, Tesis de Doctorado, Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia (1994).

Larson, E.D., S. Consonni y T.G. Kreutz; *Preliminary economics of black liquor gasifier/gas turbine cogeneration at pulp and paper mills*, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: 122, 255-261 (2000).

Larson, E.D., S. Consonni y R.E. Katofsky; *A cost-benefit assessment of biomass gasification power generation in the pulp and paper industry – Final Report* - Princeton University (2003). Acceso: [www.princeton.edu/~energy5](http://www.princeton.edu/~energy5) de mayo de 2007.

Lindblom, M. e I. Landalv; *Status of the Swedish national black liquor gasification (BLG) development program*, 2006 TAPPI Engineering, Pulping and Environmental Conference Proceedings, 10 (2006).

McKeough, P.; *Evaluation of potential improvements to black-liquor gasification technology*, Proceedings PulPaper 2004 Conferences, Energy and Carbon Management: 69-75 (2004).

Näsholm, A.S. y K. M. Westermark; *Energy studies of different cogeneration systems for black liquor gasification*, Energy Conversion: 38 (15), 1655-1663 (1997).

Nong, G., L. Xu-Sheng y W. Shuang-Fei; *Review on gasification of black liquor*, China Pulp and Paper: 25 (10), 54-58 (2006).

Reid, R.C., Prausnitz, J.M. y Poling, B.E.; *The Properties of Gases and Liquids*, p. 42-47 y 95-103, McGraw-Hill, Cingapura (1986).

Santos, P.R.; *Análise Termodinâmica de um Sistema de Cogeração com Gaseificação de Licor Negro*, Tesis de Magister, Depto. Eng. Sistemas Químicos, UNICAMP, Campinas, Brasil (2007).

Yumrutaş, R., M. Kunduz y M. Kanoğlu; *Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration Systems*, Exergy: 2, 266-272 (2002).