

# Análisis Dinámico de un Proceso de Pirólisis de Madera

A. Vázquez-Sandoval, A. Morales-Díaz, S. Carlos-Hernández\*

Cinvestav Unidad Saltillo,

Grupo de Robótica y Manufactura Avanzada, \*Grupo de Recursos Naturales y Energéticos  
Saltillo, Coah. México

arturodaniel.vazquez@cinvestav.edu.mx

Teléfono: (844)8070928

**Resumen**— Este documento presenta la metodología del modelado y análisis dinámico de un proceso de pirólisis para obtener los rangos de operación y las estrategias de control que garanticen la obtención de subproductos gaseosos de alto nivel energético, utilizando madera como materia prima.

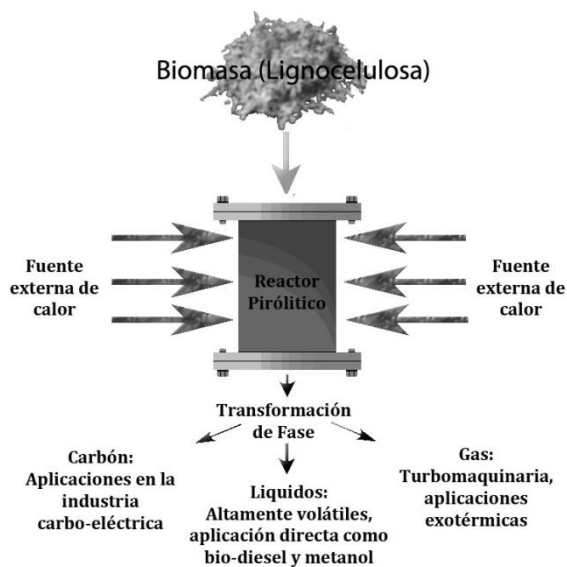
**Palabras clave:** Análisis Dinámico, Pirólisis, Energías Alternas

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente necesidad de recursos energéticos y el inminente agotamiento de las reservas de combustibles fósiles han propiciado que la comunidad científica enfoque sus esfuerzos en la obtención de fuentes renovables de energía, como lo son los bio-combustibles. A pesar de la baja densidad energética de la materia orgánica, en comparación con los combustibles fósiles, los bio-combustibles tienen la ventaja de ser fuentes renovables de energía, además de que su combustión tiene bajos índices de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Uno de los procesos con mayor confiabilidad para la producción de bio-combustibles a partir de la materia orgánica es la pirólisis. Pirólisis es el proceso de aceleración de la degradación de materia prima mediante una fuente externa de calor en ausencia de agentes oxidantes. Los productos obtenidos de dicha degradación son una mezcla de líquido (alquitran), gases y compuestos carbonosos, las proporciones en que estos residuos se crean dependen directamente de los valores de presión, temperatura y tiempo de exposición en los que se desarrolló el proceso.

Para la simulación de este proceso, se eligió madera como materia prima, ya que se puede encontrar con relativa facilidad casi cualquier parte del mundo. Otra de las ventajas de la madera es que, sin importar su origen, su composición elemental se puede definir como 50% carbono, 42% oxígeno, 6% hidrógeno y 2% de nitrógeno y otros elementos, simplificando el modelado matemático del proceso.



**Fig. 1** Esquema de un proceso de pirólisis utilizando un reactor tubular

DiBlasi<sup>1</sup> establece dos fases en el proceso de pirólisis, pirólisis primaria, que ocurre entre los a 673 y 773K, y se refiere al comienzo de la descomposición térmica en volátiles primarios, carbón y alquitranes, y pirólisis secundaria, donde la sustancia líquida comienza la transformación a su fase gaseosa, lo cual ocurre en un rango de 773 a 1123K.

Los objetivos principales de este documento son:

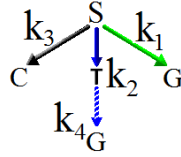
- Analizar el comportamiento del modelo matemático de un proceso de pirólisis utilizando simulación numérica, en un rango de tiempo discreto para evaluar la producción de las distintas fases creadas durante el proceso de pirólisis.
- Establecer los rangos de operación necesarios para fomentar la formación de productos gaseosos a partir de la materia prima, evaluando el costo energético de dicha operación
- Analizar mediante simulación las diferentes condiciones iniciales a las que puede ser sometido el proceso y evaluar e interpretar la respuesta del sistema, con el fin de proponer estrategias de control para maximizar la producción de los compuestos altamente energéticos.

## II. ANÁLISIS DINÁMICO

Partiendo del modelo matemático de conservación de materia en un proceso de pirólisis propuesto por Grønli<sup>2</sup> la tasa de degradación de la sustancia sólida se representa de la siguiente manera

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_s = \dot{\omega}_s \quad (1)$$

Donde  $\rho_s$  representa la densidad de la sustancia sólida en un instante de tiempo y  $\dot{\omega}_s$  representa la razón de cambio con respecto a la cinética del sistema<sup>A1</sup>.



**Fig. 2 Cinética de la degradación del sistema**

La Figura 2 presenta el esquema cinético sobre el cual ocurren las degradaciones en las 3 fases principales durante la exposición a la fuente calórica (sólido  $k_3$ , líquido  $k_2$  y gas  $k_1$ ) y la transformación subsecuente del líquido a fase gaseosa durante la pirólisis secundaria ( $k_4$ )

La tasa de producción del gas ( $\dot{\omega}_i$ ) se define por la ec. (2), utilizando la transferencia de calor convectiva por efecto de la velocidad del gas ( $V_g$ ) generada por la reacción química en la superficie, y la razón de cambio con respecto al incremento de la temperatura a raíz de la degradación volumétrica de la muestra ( $\varepsilon_g$ ).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_i^g) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_i^g V_g) = \dot{\omega}_i \quad (2)$$

Utilizando la acumulación de energía (3) y la transferencia de calor por efecto del fenómeno convectivo (4)

$$\xi = (\rho_s C_{\rho s} + \varepsilon_g \rho_g^g C_{\rho g}) \quad (3)$$

$$\beta = \rho_g^g V_g C_{\rho g} \quad (4)$$

La ecuación de conservación de energía descrita por Grønli se puede definir como

$$\xi \frac{\partial T}{\partial t} + \beta \frac{\partial T}{\partial x} = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \sum \dot{\omega}_i \Delta h_i \quad (5)$$

Donde el primer término, representa a la acumulación de energía en el sistema en función del calor específico de los subcompuestos, el segundo es la transferencia de calor por convección causada por el flujo del gas, el tercer término es la conductividad térmica efectiva y el cuarto término representa el calor neto producido durante la reacción química de la degradación.

Para resolver la ecuación (5), el sistema es desacoplado en sus dos partes principales, la parte convectiva (6), y la acumulación de energía por medios conductivos (7).

$$\beta \frac{\partial T}{\partial x} = \sum \dot{\omega}_i \Delta h_i \quad (6)$$

$$\xi \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

Desacoplando la ecuación, se procedió a integrar numéricamente ambas partes por separado, de forma secuencial, utilizando diferenciación centrada para la parte conductiva (8) utilizando series de Taylor, y una función ODE discreta para la solución de la parte convectiva.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = f''(x) \cong \frac{1}{h^2} [f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)] \quad (8)$$

Los resultados de esta integración a lo largo de la degradación total de la densidad del sólido utilizado las condiciones iniciales mostradas en la Tabla 1, y cuyos resultados pueden ser observados en las Fig. 3a y 3b, donde se muestra la respuesta del sistema durante la evolución de la temperatura hasta que la muestra de sólido se consume totalmente alrededor de los 1050K.

Analizando experimentaciones descritas en la literatura bajo las mismas condiciones de operación, se limitó la degradación del sólido a un porcentaje aproximado del 20% de su valor inicial y utilizó un intervalo discreto de tiempo de 600 segundos, el resultado se puede observar en la Fig. 3(c).

Como resultado de esta simulación, el valor final del gas representa el 54.87% de la densidad inicial del sólido, mientras que el líquido sin transformarse es el 13.08%. Esta misma prueba permite determinar un paso estimado del tiempo bajo el cual se desarrolla la degradación, utilizando este parámetro se procedió a simular bajo nuevas condiciones iniciales el proceso, utilizando una temperatura inicial de 500K.

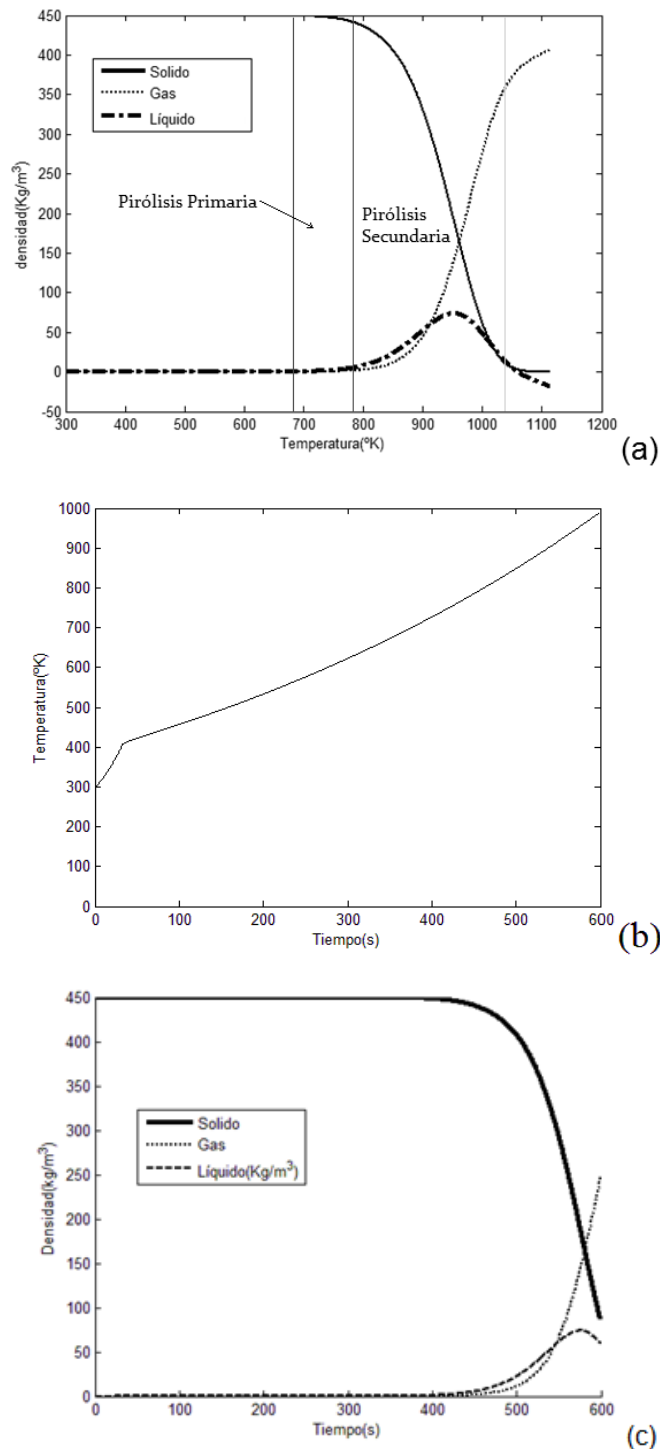
El residuo sólido aumenta con respecto a la simulación con las condiciones iniciales anteriores, sin embargo la gasificación se ve favorecida debido a la exposición a más alta temperatura de la sustancia líquida.

Se procedió a cambiar las condiciones iniciales hasta temperaturas de 500, 700 y 900K, los resultados de estas simulaciones pueden observarse en la Tabla 1, donde el comportamiento de mayor interés se generó al utilizar una  $T_i = 900K$ .

Al incrementar la  $T_i$  a 900K la producción del gas se ve favorecida debido a una mejor gasificación de la parte líquida, esto se debe a que las condiciones de pirólisis secundaria, descritas por DiBlasi se hacen presentes desde el comienzo de la simulación, exponiendo la fase líquida a altas temperaturas durante más tiempo.

La condición inicial de temperatura acelera esta devolatilización, generando menor gradiente total de

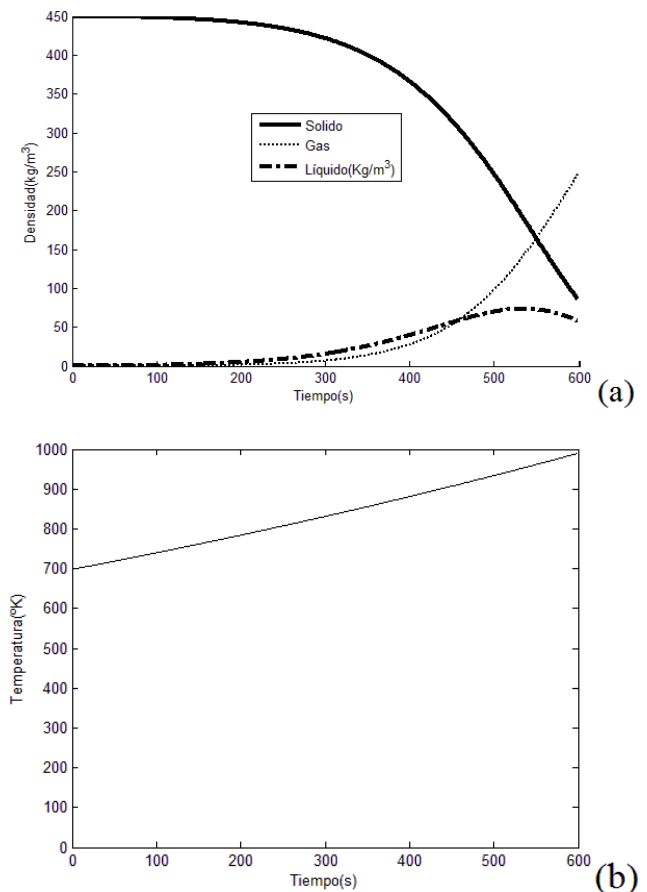
temperatura (de 900 a 1000K), la volatilización del líquido se puede apreciar en la Fig. 4(a), donde la densidad del sólido comienza a disminuir desde un principio, incrementando la cantidad de sustancia líquida y favoreciendo al valor final de la porción gaseosa.



**Tabla 1 Condiciones iniciales de las simulaciones con variaciones de temperatura**

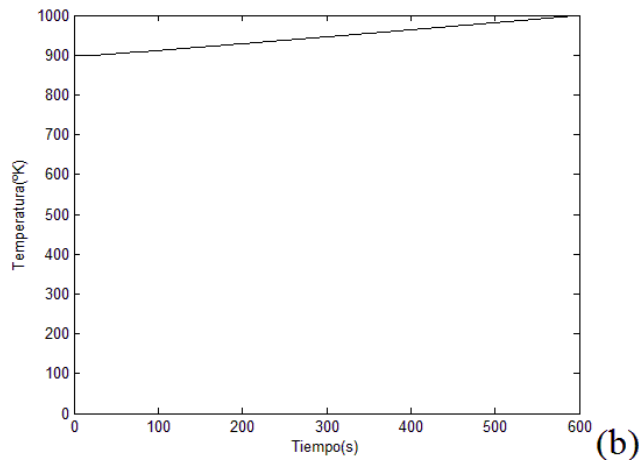
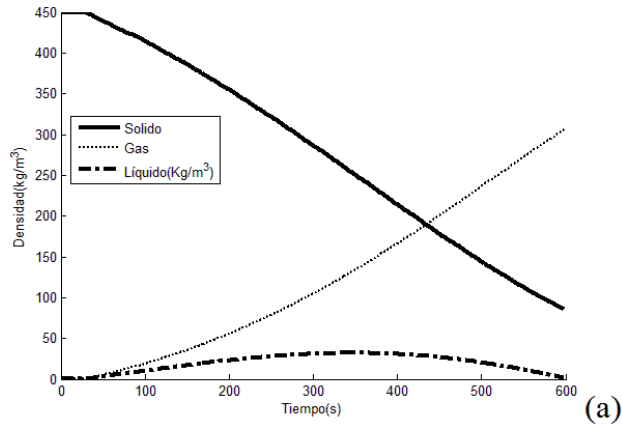
$T_i$	300K	500K	700K	900K
Presión(atm)	1atm	1atm	1atm	1atm
$\rho_{mi}$ del sólido	450Kg/m <sup>3</sup>	450	450	450
$\rho_{mi}$ del gas	0	0	0	0
$\rho_{mi}$ del líquido	0	0	0	0
$\rho_{fin}$ del sólido	86.08Kg/m <sup>3</sup> (19.13%)	85.76 (19.05%)	85.97 (19.1%)	85.73 (19.05%)
$\rho_{fin}$ del gas	246.94Kg/m <sup>3</sup> (54.87%)	247.32 (54.96%)	247.51 (55%)	306.69 (68.15%)
$\rho_{fin}$ del líquido	58.89 Kg/m <sup>3</sup> (13.08%)	58.79 (13.06%)	58.47 (12.99%)	1.51 (.03%)

En la Fig. 5 se muestra el comportamiento de la sustancia sólida con respecto a los diferentes incrementos de temperatura, donde entre mayor sea su temperatura inicial, menor será el tiempo en que el sólido comience a degradarse.



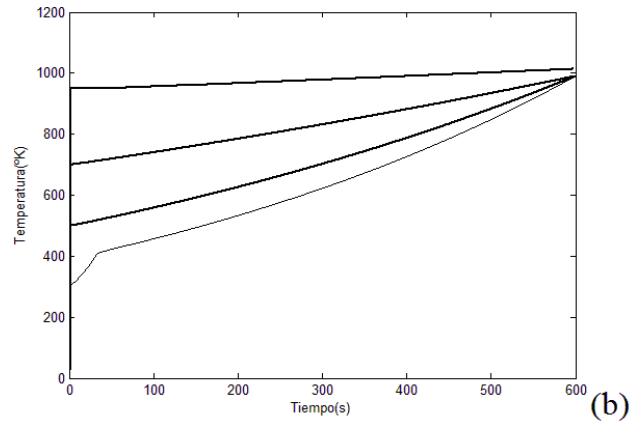
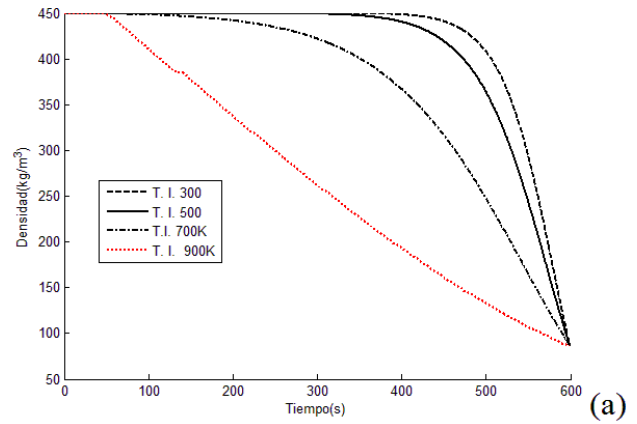
Cabe destacar el comportamiento de la curva a 900K, la cuales tiene un periodo estático antes del comienzo de la degradación, y su pendiente es contraria al resto de las curvas, esto se debe a que el líquido comienza a gasificarse de forma casi instantánea después de terminar el periodo estático, minimizando los residuos de líquido al final de la

simulación.



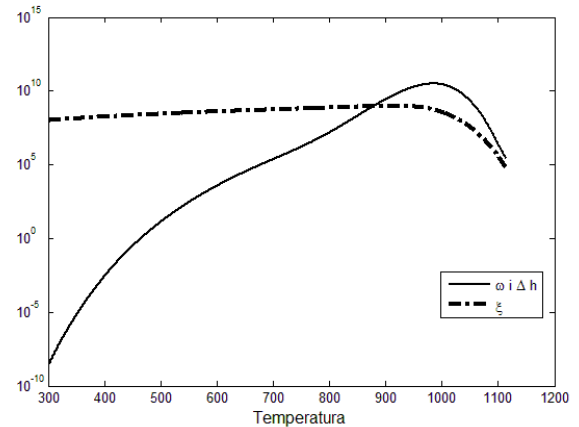
**Fig. 5 a) Transformación de la sustancia sólida cuando  $T_i = 900$**   
**b) Temperatura durante la prueba**

El comienzo de la producción de gas de manera casi instantánea resulta atractiva para los fines de este análisis, ya que el líquido se expone durante más tiempo a la fuente calórica y por lo tanto, maximiza la transformación de la fase líquida a la gaseosa, reduciendo los residuos líquidos al final de la prueba, sin embargo, en un sentido físico, precalentar y mantener esta temperatura durante el proceso requiere de una fuente calórica de alta potencia, lo cual implica un costo energético.

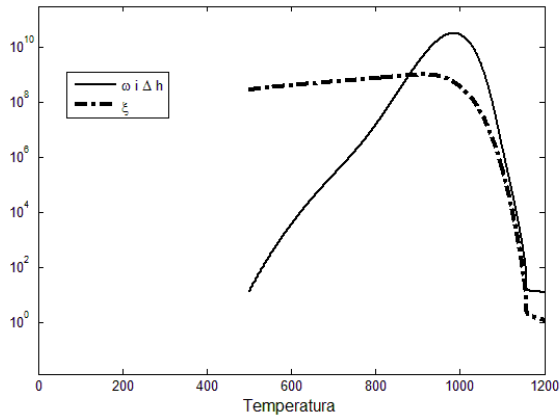


**Fig. 6 a) Tendencia de la densidad del sólido durante los incrementos de temperatura inicial**  
**b) Incremento de temperatura según las condiciones iniciales de las simulaciones**

Debido a esto, llevó a cabo un análisis energético graficando la generación de energía correspondiente a la reacción química ( $\dot{\omega}_i \Delta h_i$ ) y la acumulación de energía con respecto al tiempo ( $\xi$ ). Las Figuras 7, 8 y 9 muestran los cruces de ambas curvas como puntos de solución al sistema para las condiciones iniciales de las Tabla 1

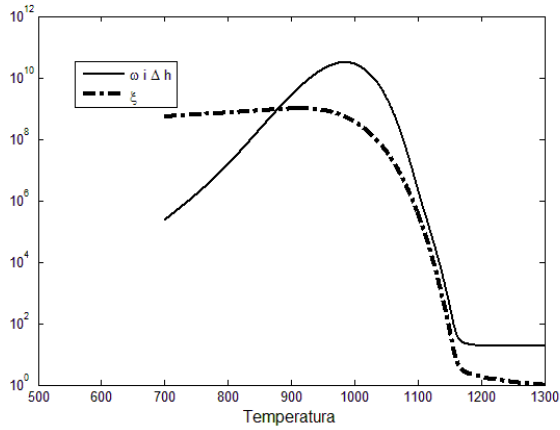


**Fig.7 Representación logarítmica a  $T_i=300K$**

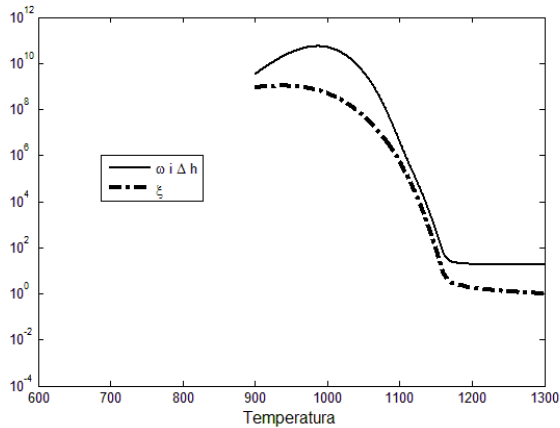


**Fig.8 Representación logarítmica a  $T_i=500K$**

En la Fig. 10 se muestra el análisis utilizando una temperatura inicial de 900K, para lo cual no hay una solución donde ambas curvas se intersecten.



**Fig. 9 Análisis logarítmico para  $T_i=700K$**

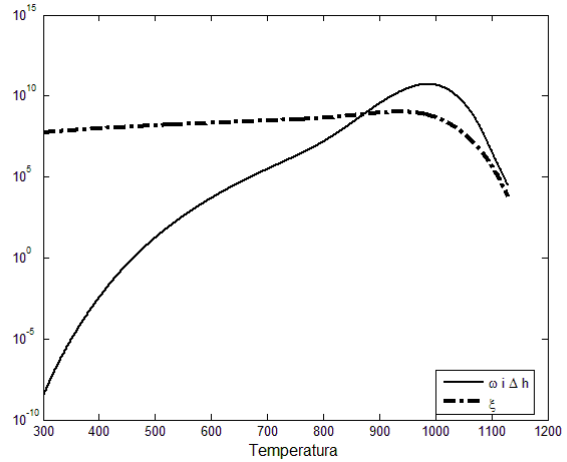


**Fig. 10 representación logarítmica a  $T_i=900$**

Utilizando estos mismos principios de dimensionamiento energético del sistema, se procedió a hacer un análisis variando la densidad de la sustancia sólida, con el fin de establecer puntos críticos de solución a la ecuación

energética. En la Fig. 11 se muestra la primera variación, de la densidad utilizando las condiciones iniciales mostradas en la Tabla 2

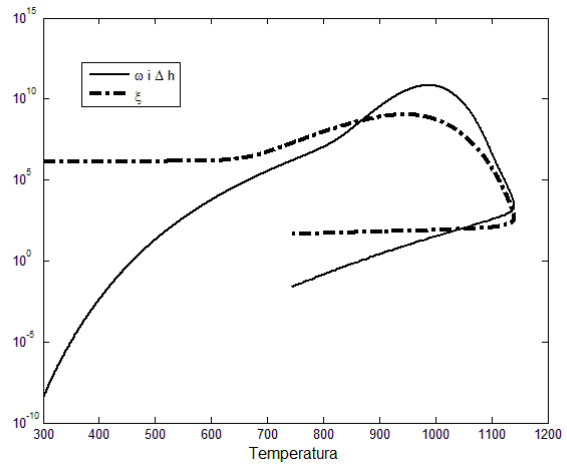
La tablas 3 muestra los resultados para  $700 \text{ kg/m}^3$ , cuyas cantidades finales de producto gaseoso muy bajas.



**Fig. 11 Análisis logarítmico para  $\rho_s=600\text{kg/m}^3$**

**Tabla 2 Condiciones iniciales de la quinta prueba**

Temperatura( $T_i$ )	300°K
Presión	1 atm
Densidad del sólido	600 $\text{Kg/m}^3$
Densidad del gas	0 $\text{Kg/m}^3$
Densidad del líquido	0 $\text{Kg/m}^3$
Densidad final del sólido	552.02 $\text{Kg/m}^3$ (92%)
Densidad final del gas	11.67 $\text{Kg/m}^3$ (1.94%)



**Fig. 12 Análisis logarítmico para  $\rho_s=700\text{kg/m}^3$**

**Tabla 3. Condiciones iniciales de la sexta prueba**

Temperatura( $T_i$ )	300°K
Presión	1 atm
Densidad del sólido	700 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas	0 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad del líquido	0 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad final del sólido	659.34 Kg/m <sup>3</sup> (94.1%)
Densidad final del gas	9.04 Kg/m <sup>3</sup> (1.29%)

Como se puede apreciar, tanto en las gráficas (11,12) como en los resultados de las tablas 2 y 3, al incrementar la densidad de la materia prima, la energía requerida en el sistema para iniciar la transformación de las fases también se incrementa, generando escasa formación de sustancia gaseosa en el mismo tiempo que dura la degradación con una densidad inicial de 450 Kg/m<sup>3</sup>. Como trabajo futuro, la metodología de control a implementar debe contemplar este cambio de densidades y compensarlo con mayor incremento de la temperatura, con la finalidad de prescindir de este parámetro dentro del modelo del fenómeno de pirólisis, ya que, al momento de implementarlo en un reactor a gran escala, toda la materia prima tendría que ser previamente caracterizada para conocer su densidad, lo que incrementaría el costo final del proceso total.

### III. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo observado en las primeras gráficas, la temperatura juega un papel muy importante en el resultado del proceso, obteniendo un pico en la relación producción/consumo entre los 600 y 900K, ya que entre estos valores, el consumo de la sustancia sólida no muestra una tendencia definida. El mayor índice de producción gaseosa se encuentra por encima de los 900K, sin embargo, alcanzar y mantener estas temperaturas dentro de periodos cortos de tiempo requiere un alto consumo energético.

Las soluciones a menor temperatura mostradas en el análisis calor neto/acumulación de energía, muestran temperaturas contenidas dentro del rango de los 800 y 900k, lo cual significa que este rango representa la temperatura que se debe controlar dentro del proceso.

La simulación de las variaciones de densidad que representan las tablas 2 y 3, muestran pocos cambios en los porcentajes de creación y consumo de las diferentes fases, la tendencia del fenómeno de la degradación indica la dificultad que tiene el proceso de utilizar madera de alta densidad, las figuras 11, 12 y 13 muestran cambios significativos ante las tendencias del calor neto y acumulación de energía del sistema, haciendo referencia a que, entre mayor sea la densidad de la materia prima, más energía se requiere para su transformación.

El modelo utilizado solamente contempla la presión superficial, la cual afecta directamente a la velocidad superficial del gas, aumentando la pérdida de energía debido

al fenómeno convectivo. Es necesario agregar un término acumulativo dentro del modelo del proceso, el cual sea afectado directamente por la presión ambiental, con el fin de obtener el valor óptimo de presión que se tiene que controlar para fomentar la producción de gas dentro del proceso.

A la fecha, se han probado diferentes metodologías de control, como control P y P.I. Actualmente se está trabajando en la utilización de estrategias de control basadas en modos deslizantes de alto orden para seguimiento de trayectorias de temperatura, estableciendo un perfil de degradación con programación de los rangos de exposición de la muestra.

### REFERENCIAS

- (1) DiBlasi, C. *Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis*. Progress in Energy and Combustion Science(34),47-90. 2008.
- (2)Grønli, M. Melaaen, M., *Mathematical Model of Wood Pyrolysis - Comparison of Experimental Measurements*. Energy & Fuels 2000, 13, 791-800