

**GASIFICACIÓN ADIABÁTICA DE BAGAZO DE BAMBÚ Y ANÁLISIS DE ENERGÍA
DE ACTIVACIÓN POR MÉTODOS ISOCONVERSIONALES NO ISOTÉRMICOS**

**Autor
DARIUN AGUIRRE MOLINA
2279**

**Asesor
JAVIER ALEJANDRO BONILLA PÁEZ
Ingeniero Electromecánico.**

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.
2017**

TABLA DE CONTENIDO

1.	LISTA DE ILUSTRACIONES	3
2.	LISTA DE TABLAS	3
3.	LISTA DE GRÁFICOS	3
4.	RESUMEN	4
5.	INTRODUCCIÓN	5
6.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
6.1.	OBJETIVO GENERAL	6
6.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
7.	MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN	7
7.1.	MARCO TEÓRICO.....	7
7.2.	MARCO CONCEPTUAL	9
	7.2.1 Bagazo de bambú.....	9
	7.2.2 Caracterización de la biomasa.....	9
8.	ANTECEDENTES.....	12
8.1	Estimación de los gases combustibles producto de la gasificación del bagazo de caña de azúcar y de la cascarilla de café usando oxígeno y oxígeno-vapor como agente oxidante [26]......	12
8.2	Gasificación adiabática del bagazo de caña de azúcar usando aire-vapor. [27]	12
9.	PROGRAMAS Y MÉTODOS	13
9.1.	MODEL FLYNN-WALL-OZAWA (FWO).....	14
9.2.	MODELO KISSINGER-AKAHIRA-SUNOSE.....	14
9.3.	MODELO FRIEDMAN	14
10.	RESULTADOS	15
10.1.	COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA	15
10.2.	ANÁLISIS ÚLTIMO Y PRÓXIMO	15
10.3.	FORMULA EMPÍRICA	16
10.4.	ENTALPÍA DE FORMACIÓN DEL BAGAZO DE BAMBÚ.....	17
10.5.	PRUEBA TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA Y DTG).....	19
10.6.	SIMULACIÓN DE GASIFICACIÓN	23
10.7.	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	27
11.	CONCLUSIONES.....	30
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	31

1. LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fuentes para producción de energía (millones de toneladas). Tomado de [4].....	5
Ilustración 2 Consumo de energías fósiles en China y EE. UU (en millones de toneladas de petróleo) fuente: statistical review of world energy 2007. [8].....	7
Ilustración 3 Ciclo del carbono [13].....	8
Ilustración 4 Emisiones por sector en equivalentes de CO ₂ [11].	8
Ilustración 5. bagazo de bambú [18].....	9
Ilustración 6. Esquema de diferentes tipos de conversión de biomasa [19].....	10

2. LISTA DE TABLAS

Tabla 1. COMPOSICIÓN BIOQUIMICA.....	15
Tabla 2. ANALISIS PROXIMO.....	15
Tabla 3. ANÁLISIS ULTIMO O ELEMENTAL	16
Tabla 4. Resultados de formula empírica.	17
Tabla 5. ENTALPÍA DE FORMACION KJ/MOL	18
Tabla 6. MASA MOLAR DEL BAMBÚ.....	18
Tabla 7. Relación de equivalencia y combustible.	23
Tabla 8. Energía de activación acorde al grado de conversión.	29

3. LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Prueba TGA Bagazo de bambú (10-gpm).....	19
Gráfico 2. Prueba TGA Bagazo de bambú (20-gpm).	20
Gráfico 3. Prueba TGA Bagazo de bambú (30-gpm).	20
Gráfico 4. Prueba TGA bagazo de bambú.	21
Gráfico 5. Masa volatilizada vs temperatura.	21
Gráfico 6. Prueba DGT bagazo de bambú.	22
Gráfico 7. Cambio de la masa volatilizada vs la temperatura frente a la temperatura a diferente tasa de calentamiento.	23
Gráfico 8. Fracción molar de CO ₂	24
Gráfico 9. Fracción molar de CO.	25
Gráfico 10. Fracción molar de H ₂	26
Gráfico 11. Fracción molar de CH ₄	26
Gráfico 12. Líneas iso-conversionales método FOW.	27
Gráfico 13. Líneas iso-conversionales método KAS.....	28
Gráfico 14. Líneas iso-conversionales método FRIEDMAN.....	28

4. RESUMEN

Este trabajo se realizó para conocer la energía de activación del bagazo de bambú, con diferentes pruebas, métodos, simulación, modelos, análisis y estudio de la gasificación adiabática, para estimar el potencial y sugerir como fuente de energía alternativa.

Entre las pruebas realizadas una de las primeras para el estudio es el análisis último y próximo obtenido por el laboratorio Tecniagricola LTDA este brinda información sobre celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas, definiendo así su composición bioquímica, pagina 15, con esta información podemos obtener la formula empírica, y así complementar la (tabla.4 Resultados de formula empírica). Se realiza un balance estequiométrico, con la formula empírica más oxígeno para conocer el valor de la entalpía de formación la cual da como resultado 535,18 kJ, pagina 18.

El análisis termo gravimétrico (TGA) se realiza en el Laboratorio de química de la universidad de los ANDES y se lleva a cabo en atmósfera inerte de nitrógeno, utilizando un rango de temperatura de 30 a 1000°C, el estudio se realiza hasta los 500°C. Los resultados se dan a tres tasas diferentes 10, 20 y 30° por minuto, pagina 20.

Con el fin de conocer el comportamiento de la gasificación, se simula este en el software NASA CEA (chemical equilibrium with applications) con los parámetros de la (tabla.7 Relación de equivalencia y combustible) página 24, y como resultado se seleccionan compuestos principalmente por H₂, CO, CO₂ y CH₄, pagina 24-27.

Por último, se realiza el análisis para conocer la energía de activación, a medida que los grados isoconversionales aumentan la energía de activación también lo hace para los tres métodos FWO, KAS Y FRIEDMAN, pagina 27-30.

5. INTRODUCCIÓN

El avance en la ciencia y los desarrollos tecnológicos que han aumentado exponencialmente a finales del siglo XX y comienzos del siglo XXI, el crecimiento poblacional y el cambio climático, son factores que aumentan la dependencia energética de la sociedad para su desarrollo. "La energía constituye junto con la materia la base de todos los fenómenos que tienen lugar en el universo"¹. [1]

La (figura 1) representa las fuentes que se usan para la generación de energía a nivel mundial, este estudio se realizó en el año 2014. El uso de biomasa como recurso energético no es tan representativo a nivel mundial, sin embargo, los países BRICS han implementado el recurso de la energía de biomasa y esto estimula el crecimiento económico [2]. La caída del petróleo fue el comienzo a la búsqueda de nuevos recursos energéticos sostenibles, el petróleo escasea desde los años 60 y llevo a las economías a transferir su dependencia desde el consumo de energía de los combustibles fósiles hasta las energías renovables [3].

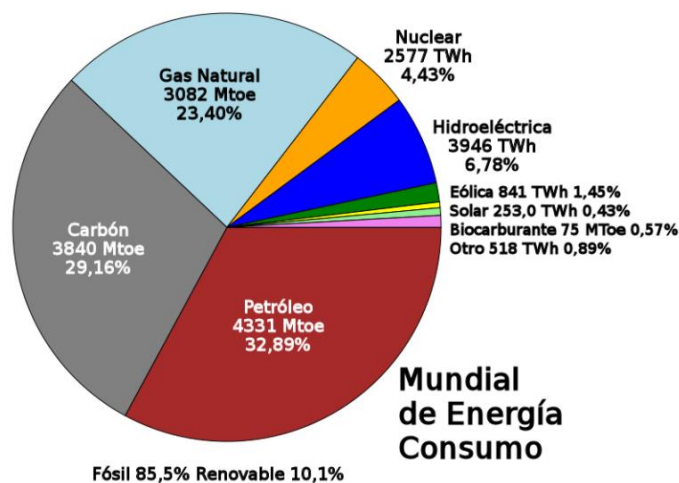


Ilustración 1. Fuentes para producción de energía (millones de toneladas). Tomado de [4]

En Colombia el 66% de la energía convencional se genera por hidroeléctricas, el 32% por generadores termoeléctricos utilizando principalmente carbón, gas y petróleo y tan solo el 2% por tecnologías que usan recursos renovables [5]. Los residuos agroindustriales se convierten en un problema no solo ambiental sino también económico [6], ya que no se tienen acopios para la disposición de los mismos y no se tiene un plan de manejo de esta clase de residuos. Estos residuos son generados en gran cantidad por el sector urbano y rural [7]. De esta manera una manera sostenible de utilización y manejo de residuos agrícolas es usarlos como combustibles para la generación de energía.

¹Di Pelino, Virgilio D. Trabajo didáctico la energía. Artículo, instituto argentino de la energía, marzo 2009. Pag 6.

6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

6.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de gasificación adiabática de bagazo de bambú y análisis de energía de activación por métodos isoconversionales no isotérmicos.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Consultar el uso del bagazo de bambú como combustible en distintos procesos termoquímicos.
- Realizar un estudio de análisis próximo, elemental, lignocelulósicos, TGA y DTG.
- Comparar los métodos isoconversionales no isotérmicos de FWO, KAS y FRIEDMAN para hallar la energía de activación, el factor pre-exponencial de Arrhenius, los cambios de entalpía, la energía libre de Gibbs y la entropía.
- Realizar una simulación termoquímica en el programa NASA CEA, para obtener resultados en la concentración molar en el syngas.

7. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

7.1. MARCO TEÓRICO

El uso de la energía ha incrementado exponencialmente después de la revolución industrial ya que la demanda para producir energía aumenta a través del tiempo y las principales potencias económicas mundiales aumentan su consumo energético. En la (figura 2), la agencia internacional de energía AIE estima que la economía mundial se multiplicará por cuatro hasta 2050 [8]. El aumento de la economía va directamente proporcional con la demanda energética, “se prevé que la demanda mundial de energía primaria aumentará el 1,5% anual entre 2007 y 2030 y pasará de 12.000 millones de toneladas de petróleo a 16.800 millones significando un incremento del 40%”². [9]

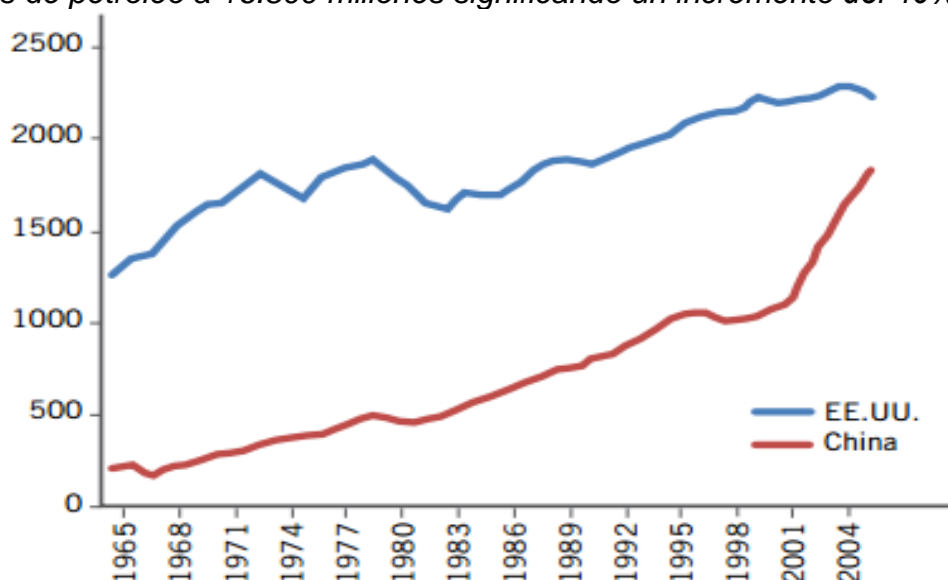


Ilustración 2 Consumo de energías fósiles en China y EE. UU (en millones de toneladas de petróleo) fuente: statistical review of world energy 2007. [8].

A pesar de que se estima por parte de AIE (International Energy Agency) que el petróleo en el año 2030 continuará siendo el combustible mayoritario entre los primarios, se hace necesario recurrir a otras fuentes de energías renovables como la solar, eólica, energía de pequeñas centrales hidroeléctricas, energía de la biomasa y de los combustibles, energía geotérmica y celdas de combustible [10].

¿Cuál es el problema con las emisiones del CO₂ (dióxido de carbono)? El CO₂ no es más que una sustancia natural, el CO₂ cumple ciclos como lo hace el agua y ayuda a regular la temperatura del planeta impidiendo parcialmente la salida de la radiación infrarroja (calor) [11, p. 77], [12, p. 9]. La concentración de este gas en la atmósfera aumentó en poco menos de un 1 por 100 anual (world resources 1986), y se triplica entre

²Castro, J. Perspectiva de la demanda energética global. Artículo, Petrotecnia, 2011. Pag 56.

1950 y 1973. Hoy en día la problemática con esta emisión es se alteran los ciclos de la naturaleza ya que la mayor parte de la energía que sustenta la sociedad actual implica la quema de combustibles fósiles aumentando la cantidad de carbono en la atmósfera.

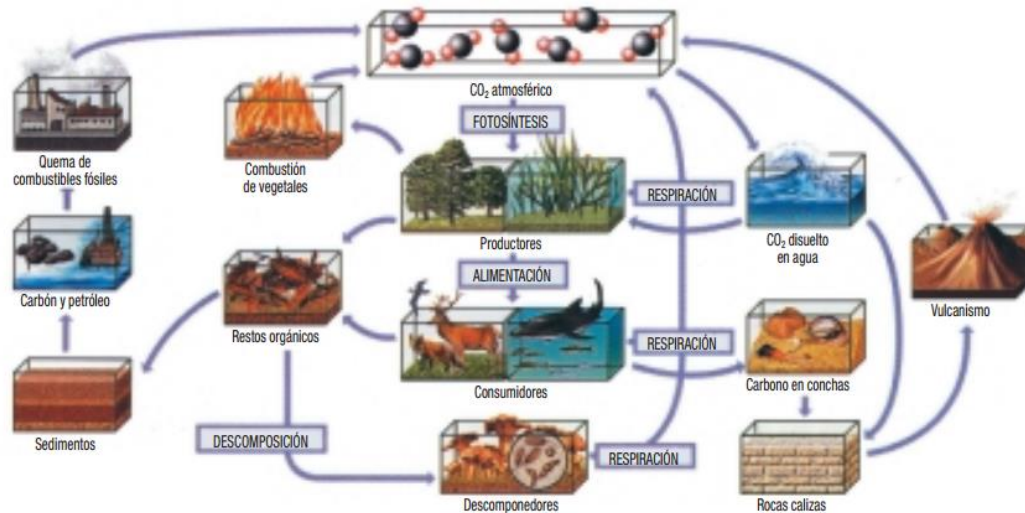


Ilustración 3 Ciclo del carbono [13].

“El ciclo del carbono es complejo, aunque consiste básicamente en la fijación del carbono atmosférico por la fotosíntesis de las plantas y su liberación por la respiración de las mismas.”³, el carbono se encuentra entre la materia viva y la materia muerta, la (figura 3) representa el ciclo del carbono [13].

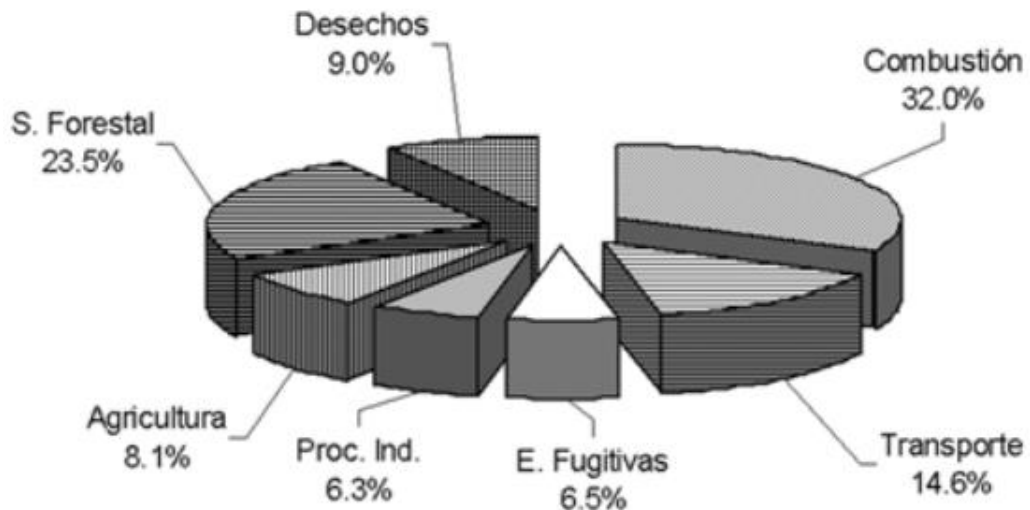


Ilustración 4 Emisiones por sector en equivalentes de CO₂ [11].

³Montero, G. Producción de biomasa. Libro, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 2005. Pag 16.

En la figura anterior se observa un gran porcentaje para procesos de combustión (32%), para procesos de combustión es recomendable usar biomásas con alto poder calorífico, la biomasa se convierte en combustible cuando esta sustancia combinada con oxígeno produciendo una reacción con desprendimiento de calor (exotérmicas) Un combustible para poder ser aplicado a nivel industrial debe cumplir unos requisitos, el primero es que disponga de grandes cantidades, que sea bajo el costo de operación, que se pueda quemar con la tecnología actual y que su poder calorífico sea razonable [14].

Combustibles son denominados de esta manera a las sustancias utilizadas para la obtención de calor, se fundamenta en la cantidad de calor que puede desarrollarse por la combustión, los combustibles se clasifican en su estado físico: Sólido, líquido y gaseoso. [15], En el caso de bambú sería un combustible sólido natural.

7.2. MARCO CONCEPTUAL

7.2.1 Bagazo de bambú

Una vez extraída la sustancia del bambú consideramos el residuo como bagazo de bambú; este compuesto presenta porcentajes de lignina 19,98%, celulosa 41,67% y Hemi-celulosa 73,24% [16]. Antes de ser bagazo de bambú esta planta es una caña larga, se estima un amplio grupo aproximado en 1250 especies que van de 10 cm a 40 m de altura, varios estudios realizados han destacado al bambú como potencial bioenergético [17].



Ilustración 5. Bagazo de bambú [18]

7.2.2 Caracterización de la biomasa

Biomasa: Compuesta por carbón, oxígeno, hidrógeno y minerales en bajo porcentaje como potasio, fósforo, sulfuro y otros componentes principales conocidos como celulosa,

hemicelulosa y lignina. [19], [20] que al ser quemada produce CO₂ de manera neutral. Actualmente la contribución de la biomasa a la producción de energía total en el mundo apenas es del 12% [21].

Biomasa combustible: La biomasa se convierte en biocombustible por combustión directa, procesos termoquímicos o conversión bioquímica.

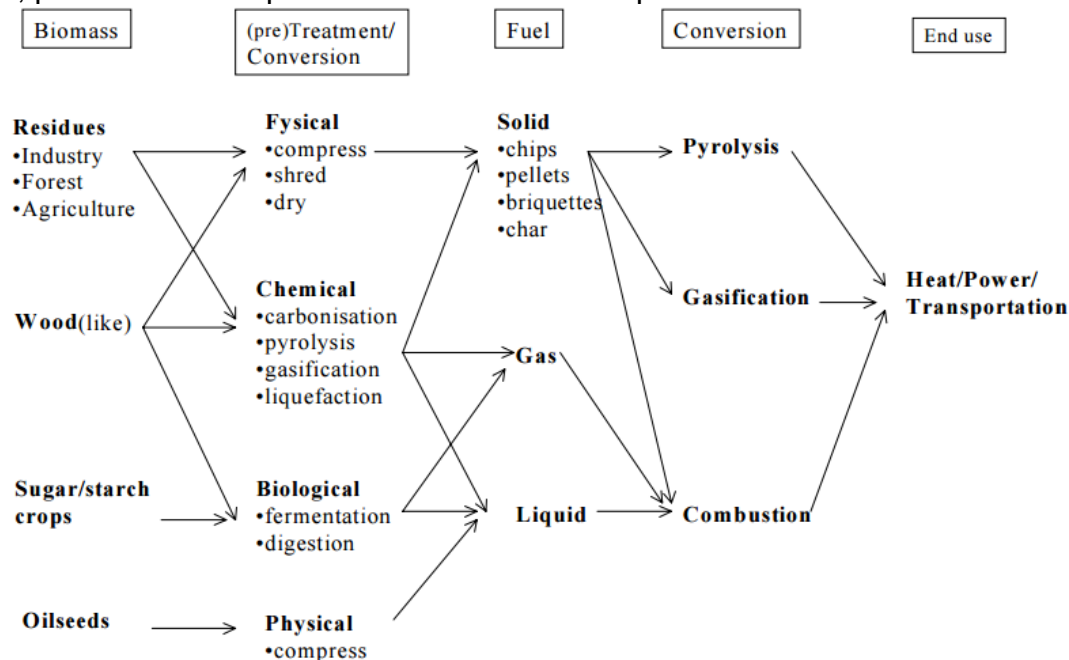
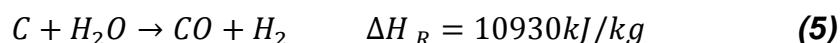
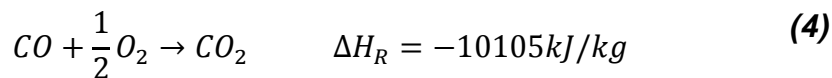
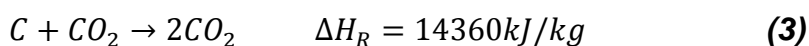
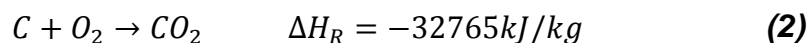
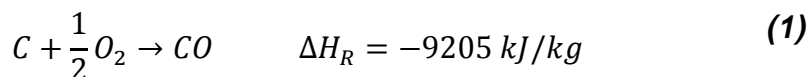
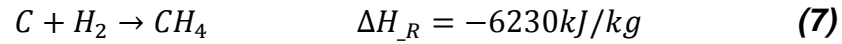
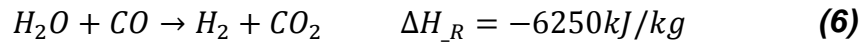


Ilustración 6. Esquema de diferentes tipos de conversión de biomasa [19].

Gasificación: Es una tecnología alternativa a los combustibles convencionales, consiste en quemar parcialmente el combustible con el fin de formar una mezcla de gases “CO, H₂, H₂S+CO_s, CH₄, CO₂, con partículas in quemadas, denominado gas de síntesis”⁴ [22] [19]. El proceso global se puede moldear con las siguientes ecuaciones [23].



⁴ Martínez E; Vicente W; Salinas V. Simulation de un Sistema de gasificación integradas a un cycle combined. 2006



Pirólisis: Proceso termoquímico que ocurre en ausencia de oxígeno, consiste en cuatro etapas: Dosificación, Alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y finalmente la obtención y separación de los productos [24]. *“pirólisis siempre es el primer paso en los procesos de combustión y gasificación”*⁵

Poder calorífico: Es la energía liberada de la combustión completa.

Análisis próximo y último: Son análisis que determinan características de sustancias como la humedad, cenizas, material volátil se rige por una normativa por ejemplo en el caso del carbón ASTM D3172 [25].

⁵ Klug M. Pyrolysis un proceso para derretir la biomasa. Revista de química. 2013. Pag 26.

8. ANTECEDENTES

8.1 Estimación de los gases combustibles producto de la gasificación del bagazo de caña de azúcar y de la cascarilla de café usando oxígeno y oxígeno-vapor como agente oxidante [26].

En este trabajo de opción de grado, se analizó el bagazo de caña de azúcar y la cascarilla de café como productor de gases combustible, se caracteriza, se realizan análisis próximo y ultimo con el fin de someter los biocombustibles a procesos de gasificación, se utilizan los programas nasa CEA (chemical equilibrium with applications), y es engineering equation solver para obtener propiedades de combustión, concentración de los gases producidos por la gasificación, estos parámetros son propuestos en este proyecto. El modelo utilizado es llamado átomo-balance. Como resultados del trabajo se presentan las reacciones de las simulaciones brindando la cantidad de di oxígeno necesario para conseguir una oxidación completa, los resultados son comparados con el modelo de equilibrio químico para su validación. Como conclusión se logra estimas los gases producto de la gasificación.

8.2 Gasificación adiabática del bagazo de caña de azúcar usando aire-vapor. [27]

Se presenta un estudio para estimar el potencial del bagazo de caña de azúcar como combustible alternativo, para ser usado en centrales generadoras de energía, el trabajo presenta un modelo de equilibrio químico para estimar las especies producidas por gasificación adiabática del bagazo con diferentes mezclas de aire-vapor. Utilizando el programa CEA (chemical equilibrium with applications), se presenta como resultados gasificación con aire y gasificación con aire-vapor, mostrando las fracciones molares de las especies producidas, incrementando la ER (relación entre Aire técnico y Aire actual) se tiende a producir gases ricos en CO y H₂, pero pobres en CO₂ y H₂O. Como conclusión para la producción de gases es más sensible la variación de ER que la variación en la SF (relación entre vapor y combustible), la gasificación del bagazo con aire produce mezclas ricas en CO; mientras que con aire-vapor son ricas en H₂.

9. PROGRAMAS Y MÉTODOS

Para determinar el cálculo de la energía de activación existen diferentes métodos para estudiar la cinética de los procesos no isotérmicos, mediante métodos estadísticos y predicciones de la actividad compleja para el valor del factor pre-exponencial, estos tienden a producir valores inciertos. Por otro lado, los métodos isoconversionales tienen valores más exactos, en este caso utilizaremos FWO, KAS y FRIEDMAN.

En los cálculos que se realizan existen diferentes variables entre ellas el grado de conversión (α) se define a continuación, con esta ecuación se determina la fracción de materia volatilizada durante el proceso de pirólisis donde w_0 , w_t , w_∞ son el peso de la muestra inicial, el peso de la muestra en el tiempo, y el peso final de la muestra respectivamente.

$$\alpha = \frac{w_0 - w_t}{w_0 - w_\infty} \quad (8)$$

La tasa de conversión se puede ver en la siguiente ecuación. K es la tasa de descomposición constante y $f(\alpha)$ es el modelo de degradación.

$$\frac{d\alpha}{dt} = Kf(\alpha) \quad (9)$$

Usando la formulación de Arrhenius

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (10)$$

La constante de la velocidad se puede expresar como.

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (11)$$

Donde A , E y R son el factor de frecuencia (coeficiente pre exponencial), la energía de activación y la constante de gas universal, respectivamente. En condiciones no isotérmicas, donde la velocidad de calentamiento es conocida, la temperatura de la muestra podría estar relacionada con el tiempo.

$$T_T = T_0 + \beta_t \quad (12)$$

Donde T_0 es la temperatura inicial y β es la tasa de calentamiento usando la ecuación 12 la tasa de conversión puede ser transformada en la derivada de la temperatura.

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (13)$$

La ecuación 15 y separando las variables α y T , y luego integrando se obtiene.

$$g(\alpha) = \int_0^T \frac{A}{\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \cdot dT \quad (14)$$

9.1. MODEL FLYNN-WALL-OZAWA (FWO)

Este método se basa en los resultados de las pruebas TGA con velocidades y calentamientos constantes. Así, relacionando el logaritmo natural de la fracción de descomposición y el recíproco de la temperatura absoluto se obtiene una función lineal donde su pendiente es proporcional a la energía de activación. [28].

En este método, la ecuación (17) se integró y se hace la aproximación de Doyle [32] se aplicó a la temperatura integral. La ecuación resultante es:

$$\ln\beta = \ln\left[\frac{AE}{Rg(\alpha)}\right] - 5,331 - 1,052 \frac{E}{RT} \quad (15)$$

A partir de las velocidades de calentamiento, se trazaron y se ajustaron a una línea recta. La pendiente, $(-1.052 (Ea / R))$. [28].

9.2. MODELO KISSINGER-AKAHIRA-SUNOSE.

El método KAS es un método diferencial basado en la ecuación de Arrhenius. Este método deduce que, para una conversión dada, el logaritmo de la velocidad de calentamiento sobre el cuadrado de la temperatura absoluta se puede relacionar linealmente con el recíproco de la temperatura absoluta. La pendiente es entonces proporcional a la energía de activación

$$\ln\left[\frac{\beta}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{Eg(\alpha)}\right] - \frac{E}{RT} \quad (16)$$

Se puede tratar como una línea recta comparando $\ln[(\beta/T^2)]$ con $1/T$ donde la pendiente es $-E/R$ y así conocer la energía de activación.

9.3. MODELO FRIEDMAN

Este método utiliza la variación de la fracción de conversión respecto a la temperatura para calcular energía de activación [28] con una tasa de calentamiento constante y una temperatura determinada. De la ecuación 14 se obtiene la siguiente ecuación.

$$\beta \left(\frac{d\alpha}{dT} \right) = A \exp \left(\frac{-E}{RT} \right) f(\alpha) \quad (17)$$

Aplicando logaritmo natural a ambos lados de la ecuación se obtiene la ecuación 10 que hace referencia al método FRIEDMAN.

$$\ln \left(\beta \frac{d\alpha}{dT} \right) = \ln(Af(\alpha)) - \frac{E}{RT} \quad (18)$$

Graficando $\ln[\beta(d\alpha/dT)]$ con $1/T$ se determina la pendiente la cual equivale a $-E/R$ y con esta se determina la energía de activación.

10. RESULTADOS

10.1. COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA

Como primera instancia se cuenta con los resultados obtenidos por _TECNIAGRICOLA LTDA_ Doctor calderón_ donde se define la caracterización de la biomasa en función de su composición química. Esta caracterización hecha por el método Van soest; haciendo digestión del bagazo de bambú en detergente ácido (ADF) determina la cantidad de componentes que conforman la materia a continuación los resultados en función de hemicelulosa, celulosa y lignina (tabla 1).

Tabla 1. COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA	
CELULOSA	43
HEMICELULOSA	11
LIGNINA	22

10.2. ANÁLISIS ÚLTIMO Y PRÓXIMO

En el análisis próximo se determina el % en masa de cenizas, material volátil, carbón fijo. Este resultado realizado en laboratorio químico de la empresa SGS Colombia bajo la norma ASTM E-870-06 (tabla 2).

Tabla 2. ANÁLISIS PRÓXIMO	
HUMEDAD	10.24
CARBÓN FIJO	19.23

VOLÁTILES	67.32
CENIZAS	3.21

En el análisis próximo se determina el porcentaje en masa de carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno y oxígeno de la biomasa, realizado bajo la norma E-777. El hidrógeno y el azufre se determinan por combustión de la muestra; el nitrógeno se determina por el método Kjeldahl y finalmente el oxígeno se calcula por diferencia: Carbón fijo % = 100 – (carbono + % hidrógeno + % azufre + % nitrógeno) [29].

CARBONO	41
HIDRÓGENO	7.2
NITRÓGENO	0.49
AZUFRE (S)	0.029
OXÍGENO (O)	54.23
HHV	18,3 kJ/g

10.3. FORMULA EMPÍRICA

Se determina la formula empírica haciendo uso del análisis último, en esta fórmula se presenta la composición química y proporción de átomos de cada elemento siendo el carbón e hidrógeno elementales, y otros como nitrógeno, silicio, azufre y oxígeno.

1. **CANTIDAD DE MOLES:** Se debe multiplicar el porcentaje en masa del compuesto con 100g/masa atómica de cada elemento, según lo muestra la ecuación 8.

$$\% \text{ Masa} * \frac{100g}{\text{masa atómica}} = \text{Atomos (19)}$$

2. **ÁTOMOS (DAF):** Una vez obtenido la cantidad de moles de cada elemento se divide por (1-%ceniza-%humedad), y así obtener el número de moles libres de humedad y ceniza (DAF).

$$\frac{\text{Atomos}}{1-\%ceniza-\%humedad} = \text{atm DAF (20)}$$

3. **ÁTOMOS NORMALIZADOS:** Por último, se normalizan los átomos dividiendo cada átomo (DAF) entre el átomo (DAF) del carbón.

$$\frac{\text{atm DAF}}{\text{atm DAF del carbón}} = \text{Atomos normalizados. (21)}$$

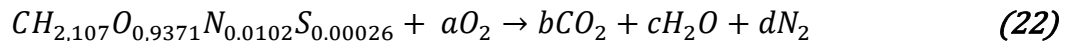
Tabla 4. Resultados de formula empírica.

COMPUESTO	% MASA	MASA ATÓMICA g/mol	CANTIDAD DE MOLES	ATM DAF	ATM NORMALIZADOS.
CARBONO	41	12	341,666667	394,76218	1
HIDRÓGENO	7.2	1	720	831,889081	2,10731707
NITRÓGENO	0.49	14	3,5	4,04390526	0,0102439
AZUFRE (S)	0.029	32	0,090625	0,10470826	0,00026524
OXÍGENO (O)	51.23	16	320,1875	369,945118	0,93713415

A partir del resultado se crea la formula empírica: $CH_{2,107}O_{0,9371}N_{0,0102}S_{0,00026}$

10.4. ENTALPÍA DE FORMACIÓN DEL BAGAZO DE BAMBÚ

Se realiza un balance estequiométrico. Con la formula empírica más oxígeno. La combustión completa genera reacciones químicas de $CO_2 + H_2O + N_2$, por tanto se obtiene la siguiente ecuación:



Las incógnitas a encontrar serán a, b, c y d que corresponden a el número de moles de cada elemento. Para ello se realiza un balance estequiométrico, del cual se obtienen las siguientes ecuaciones:

Carbono

$$b = 1 \quad (23)$$

Hidrógeno

$$c = \frac{2,1}{2} = 1,05 \quad (24)$$

Oxígeno

$$a = \frac{2*b+c-0,94}{2} = 1,055 \quad (25)$$

Nitrógeno

$$d = \frac{0,01}{2} = 0,005 \quad (26)$$

Una vez obtenido estos valores con ayuda de la (ecuación 13) se halla la entalpía de formación del bagazo de bambú, para ello es necesario conocer la entalpía de formación de cada elemento (tabla 5) y la masa molar del bambú (tabla 6), que será multiplicada por HHV de la siguiente manera. $18,3 \text{ kJ/g} * 29,24 \text{ g/mol} = 535,18 \text{ kJ}$.

Tabla 5. ENTALPÍA DE FORMACIÓN kJ/MOL		# MOLES
O	0	1,055
CO ₂	-393,776	1
H ₂ O	-285,84	1,05
N ₂	0	0,005

$$HHV = \sum n_R \Delta H_{fR} - \sum n_P \Delta H_{fP} \quad (27)$$

Tabla 6. MASA MOLAR DEL BAMBÚ.			
COMPUESTO	MASA ATÓMICA g/mol	ATM NORMALIZADOS.	
CARBONO	12	1	12
HIDRÓGENO	1	2,10731707	2,108
NITRÓGENO	14	0,0102439	0,143
OXÍGENO (O)	16	0,93713415	14,99
MASA MOLAR DEL BAMBÚ			29,25 g/mol

$$HHV = 535,18 \text{ kJ}$$

$$\sum n_R \Delta H_{fR} = [(1 * H_{fB}) + (1,055 * 0)]$$

$$\sum n_P \Delta H_{fP} = [(1 \text{ mol} * -393,52 \text{ kJ/mol}) + (1,05 \text{ mol} * -285,84 \text{ kJ/mol})]$$

Al despejar H_{fB} de la (ecuación 13) se obtiene la entalpía de formación del bagazo de bambú $H_{fB} = -158,498 \text{ KJ/mol}$

10.5. PRUEBA TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA Y DTG)

Con una termo balanza se pesa la masa residual calentada y esto genera hidrocarburos. El sistema consiste en una balanza, un horno de mufla y un sistema de suministro de agente oxidante (aire) o inerte (N₂) di-nitrógeno. De volatilización es el proceso donde se registra de forma continua la pérdida de masa.

En este trabajo se realizan tres pruebas TGA:

La primera es realizada a una razón de 10 grados por minuto, al llegar a la temperatura de 500°C se deja 5 minutos. La balanza brinda una masa inicial de 9,65505 mg y la termocupla brinda una temperatura inicial de 30 Celsius. A continuación, el gráfico de esta prueba.

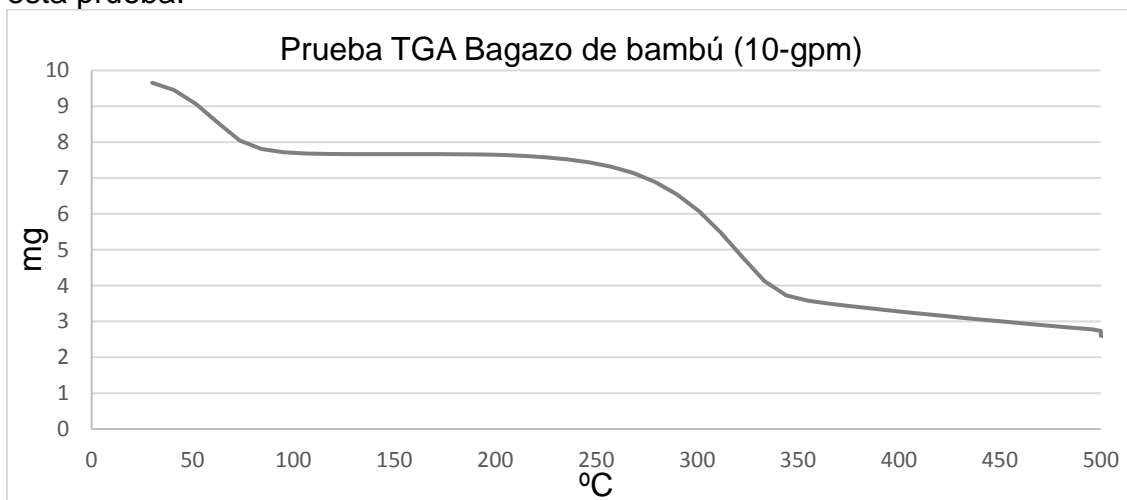


Gráfico 1. Prueba TGA Bagazo de bambú (10-gpm).

La segunda prueba TGA es realizada a una razón de 20 grados por minuto, igual a la primera prueba, al llegar a T=500°C se esperan 5 minutos. Los datos iniciales indican 9,19971 mg y Ti=30°C.

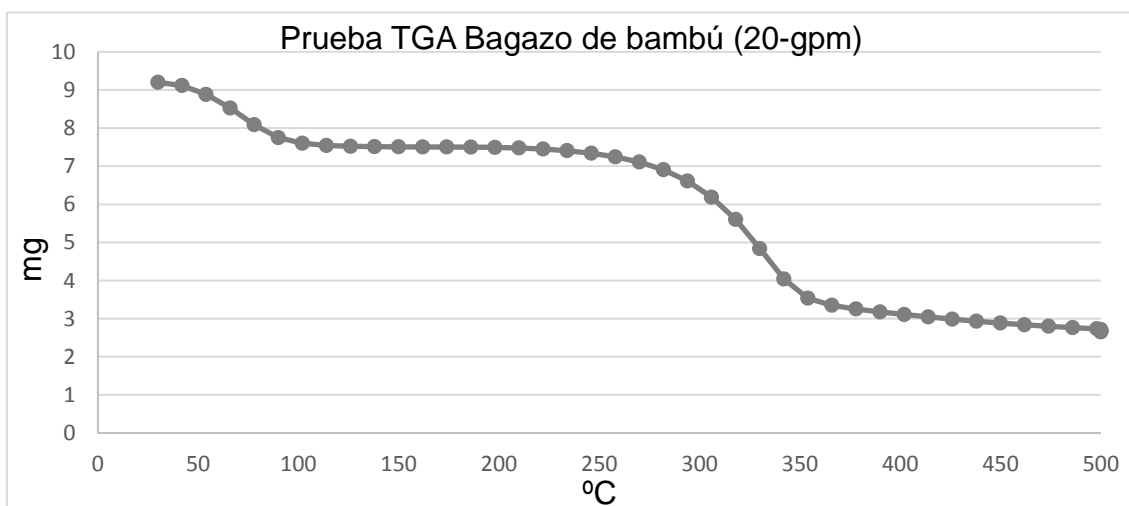


Gráfico 2. Prueba TGA Bagazo de bambú (20-gpm).

La última prueba TGA es realizada a una razón de 30 grados por minuto, cumpliendo el mismo parámetro de las dos pruebas anteriores. Sus datos iniciales son masa inicial 8,39414 mg y $T_i=30^\circ\text{C}$.

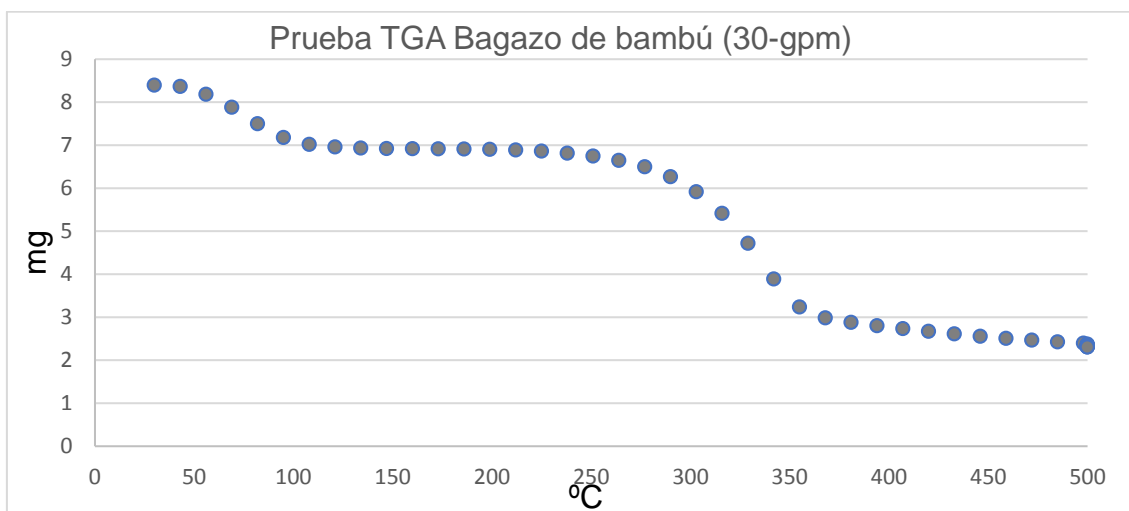


Gráfico 3. Prueba TGA Bagazo de bambú (30-gpm).

En el gráfico 4 se presenta el porcentaje de masa residual; los resultados del análisis TGA del bagazo de bambú, se emplearon 3 tasas de calentamiento de 10, 20 y 30 grados por minuto $^\circ\text{C}/\text{min}$, y temperatura entre 30 y 500 $^\circ\text{C}$. Se puede interpretar la pérdida de peso considerable en dos áreas (30-100) y (270-350). En la zona 1 (0-100) volatilización de humedad, se presentan valores de 20% 16% y 14% respectivamente, en la zona 2 (100-250) donde se inicia la descomposición de los extraíbles se presentan valores de 4% 3% y 7% respectivamente. En la zona 3 (250-400) inicia la descomposición de

hemicelulosa valores de 42,7% 45% 49%. En la zona 4 (400-500) se encuentra mayor cantidad de masa volatilizada dada por la celulosa y hemicelulosa valores de 4,8% 3,2% y 4,6%. [30].

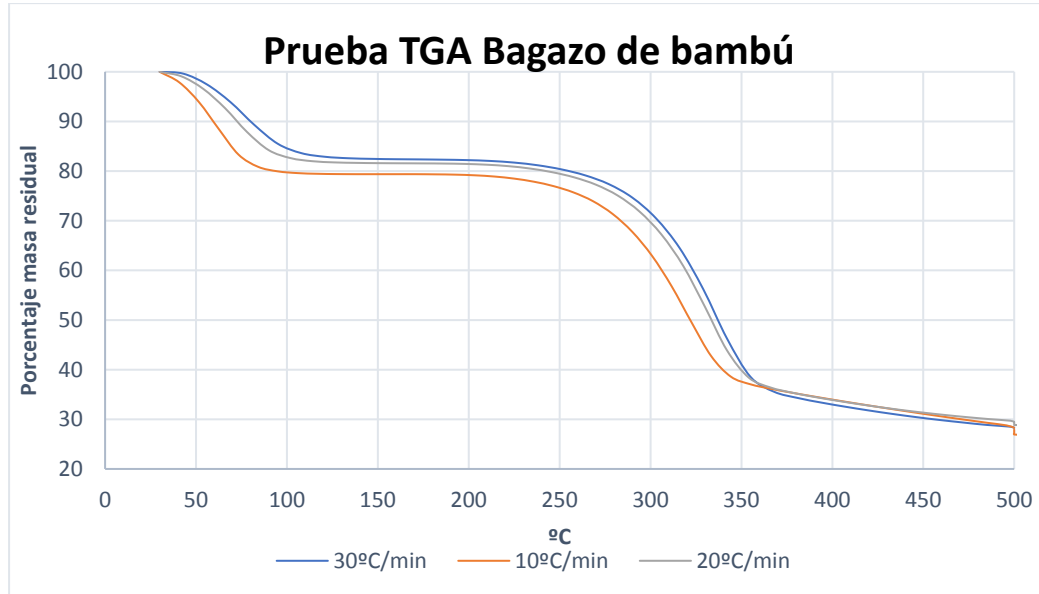


Gráfico 4. Prueba TGA bagazo de bambú.

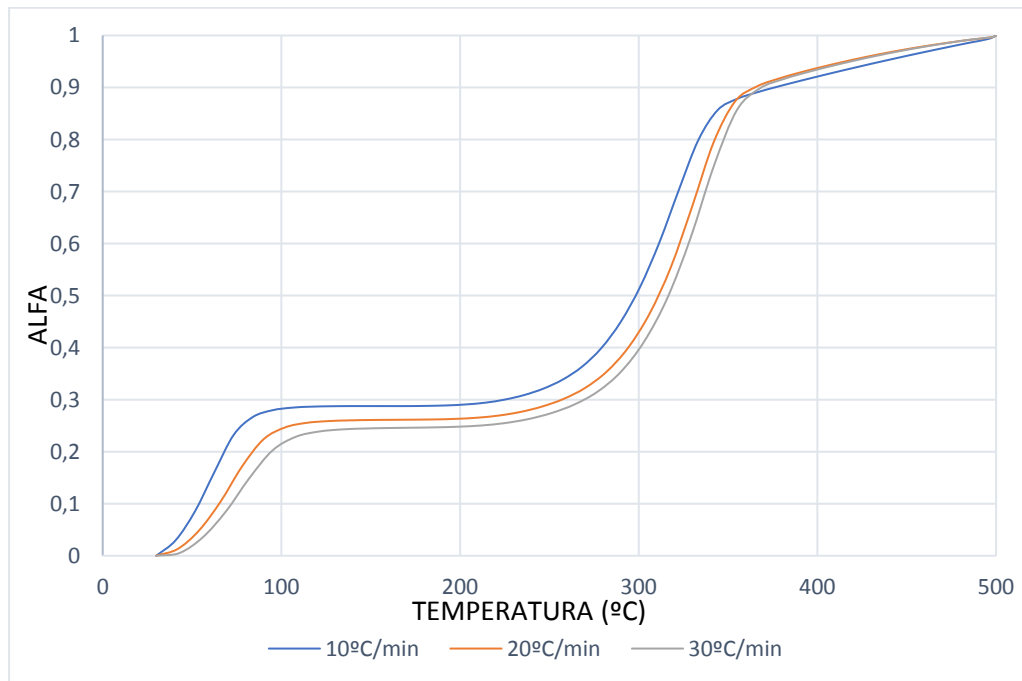


Gráfico 5. Masa volatilizada vs temperatura.

En el gráfico 6 se presenta la curva DTG del bagazo de bambú, este gráfico se observa la derivada de la curva TGA, con la misma información se puede apreciar en que temperaturas existe la mayor cantidad de materia volatilizada, en este gráfico se observa de 30-110 para las tres tazas de calentamiento un pico que representa la materia volatilizada en humedad, luego de 120-200 no existen volátiles y entre 250-380 un pico aun mayo que el primero donde se descompone la hemicelulosa de acuerdo a la información del gráfico anterior.

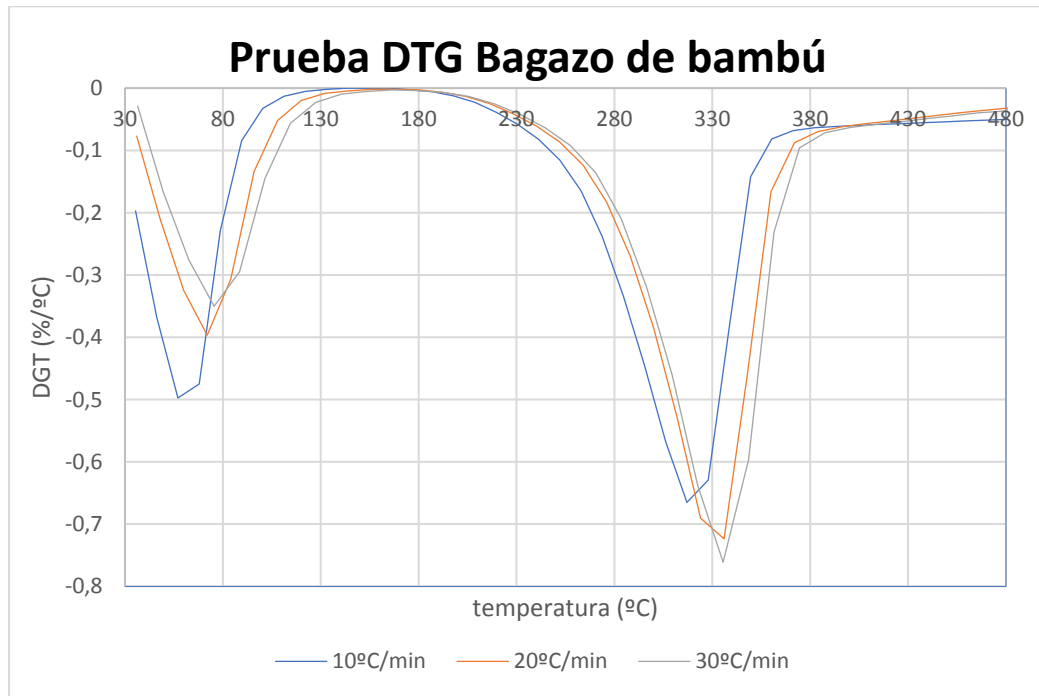


Gráfico 6. Prueba DTG bagazo de bambú.

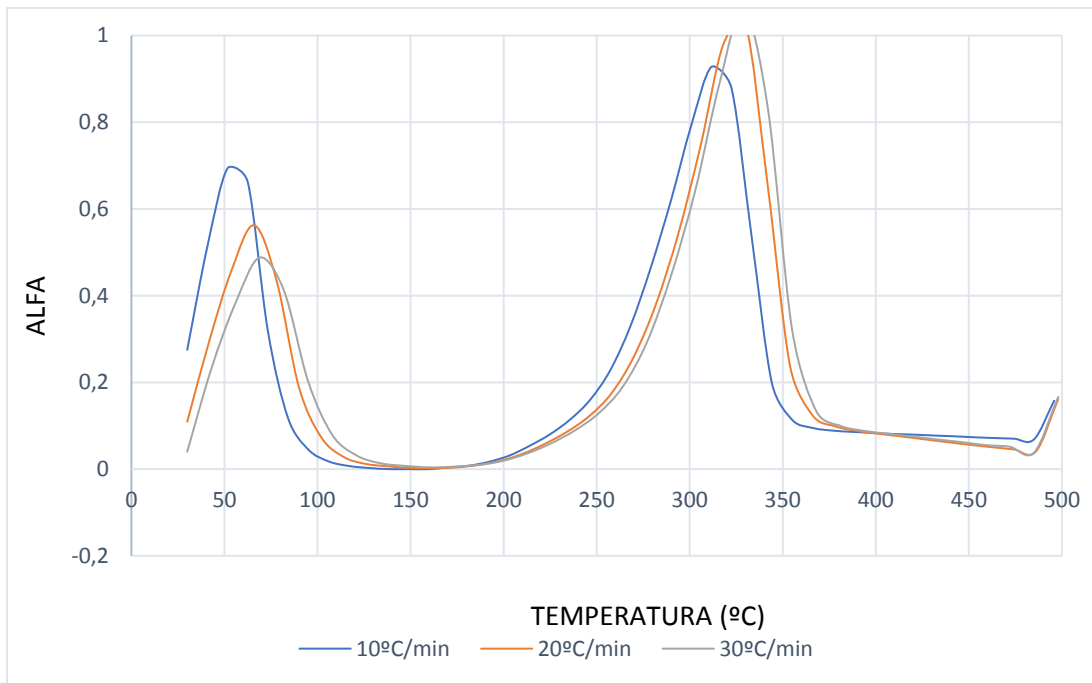


Gráfico 7. Cambio de la masa volatilizada vs la temperatura frente a la temperatura a diferente tasa de calentamiento.

10.6. SIMULACIÓN DE GASIFICACIÓN

Con el fin de conocer el comportamiento resultado de la gasificación, se realiza una simulación en el programa Nasa CEA con la entalpía de formación H_{fB} Bagazo de bambú, utilizando como parámetros, agente oxidante O_2 a temperatura $25^\circ C$ y agente reformado H_2O a temperatura $100^\circ C$. Posteriormente se asigna la relación de equivalencia (ER) y la relación de vapor combustible (SF) (tabla 7), parámetros que rigen la cantidad de oxígeno y vapor por unidad de mol de combustible suministrada al proceso de gasificación para la generación del syngas en base seca compuesto principalmente por H_2 , CO , CO_2 y CH_4 .

Tabla 7. Relación de equivalencia y combustible.

ER	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
SF	0.3	0.6	0.9	1.2							

En el gráfico 8 se evidencia el comportamiento de CO_2 para distintos valores de SF, a partir de ella determina que todas las curvas tienen una fuerte caída en la fracción molar del CO_2 hasta $ER=2.5$. Para valores de $ER>3$ la curva presenta un comportamiento similar, su única diferencia es que a mayor SF, mayor fracción de CO_2 . Esto se debe

principalmente a que existe mayor cantidad de H₂O disponible en el ambiente y la reacción wáter-gas es más competitiva para valores de ER>3.

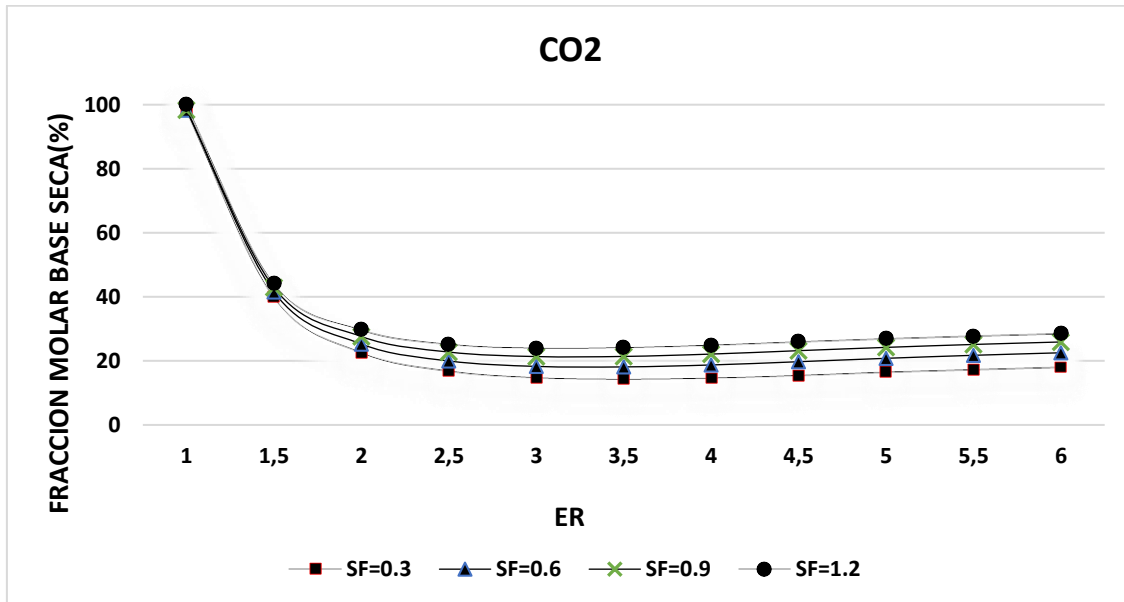


Gráfico 8. Fracción molar de CO₂.

En el gráfico 9 se observa el comportamiento de CO a diferentes relaciones SF y ER, se evidencia que para valores de SF>1.5 presentan todas las curvas disminución considerable en la fracción molar del compuesto, esto es debido a la adición de vapor de agua a una temperatura de 100°C, lo cual disminuye la temperatura de gasificación y aumenta la concentración del H₂O. En SF=2 encontramos el pico de todas las curvas, esto se debe a las reacciones endotérmicas.

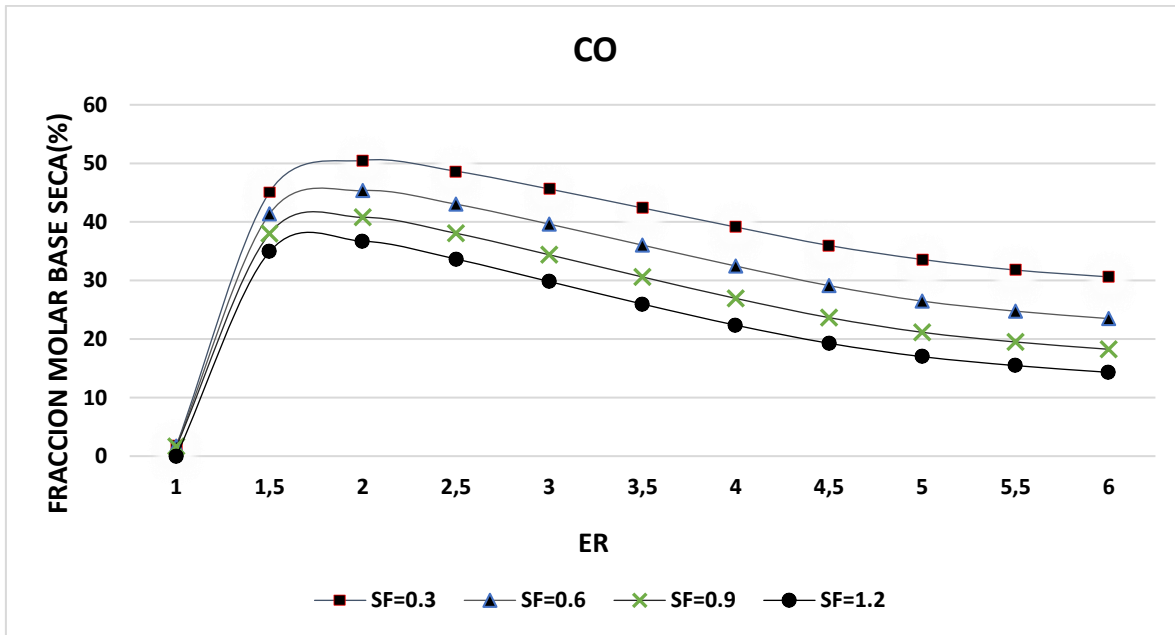


Gráfico 9. Fracción molar de CO.

El hidrógeno es el gas que mayor poder calorífico tiene por unidad de masa. Para obtener mayor hidrógeno es necesario suministrar mayor vapor al proceso de gasificación. En el gráfico 10 se observa el comportamiento de hidrógeno a diferentes relaciones SF Y ER, se evidencia que para cualquier curva ER al aumentar el SF aumenta también la concentración de H₂. Para este caso el pico de las curvas se presenta en SF=5 y ER=1.2 con una concentración del 56,8% en el syngas de salida en base seca. Con un SF=5 podemos aumentar el valor de ER para generar mayor proporción de hidrógeno.

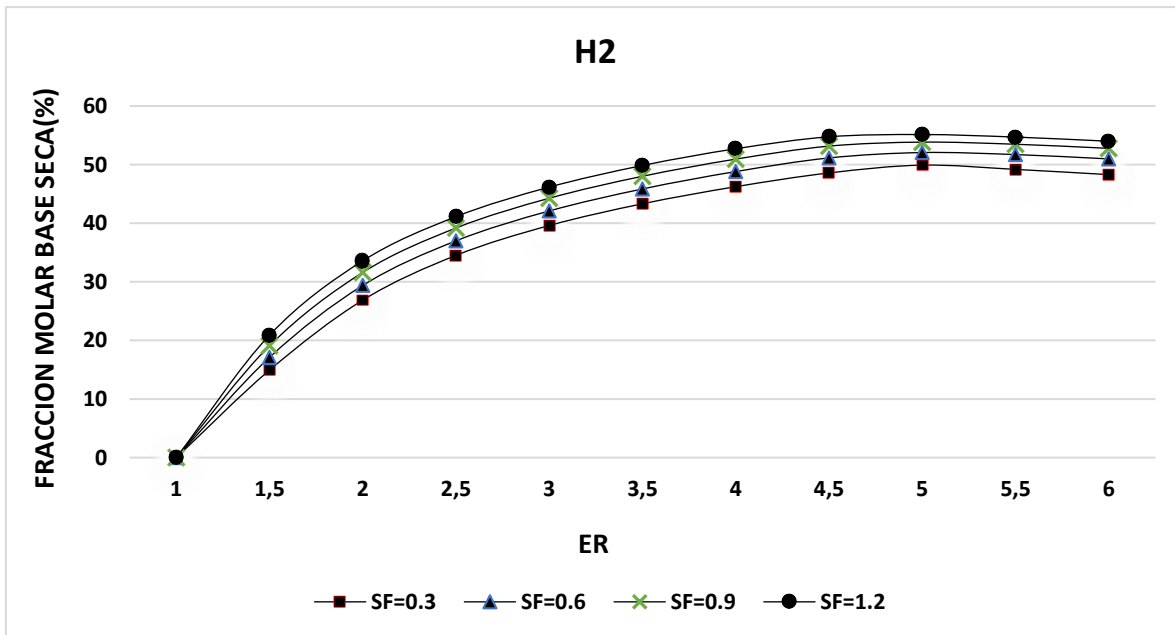


Gráfico 10. Fracción molar de H₂.

En el gráfico 11 se observa la concentración de metano, se observa que la concentración de metano aumenta cuando el valor de ER es igual o mayor a 4.5, efecto dado por la baja concentración de oxígeno en el proceso, disminuyendo la temperatura del proceso de gasificación y dando pasó al proceso de pirólisis.

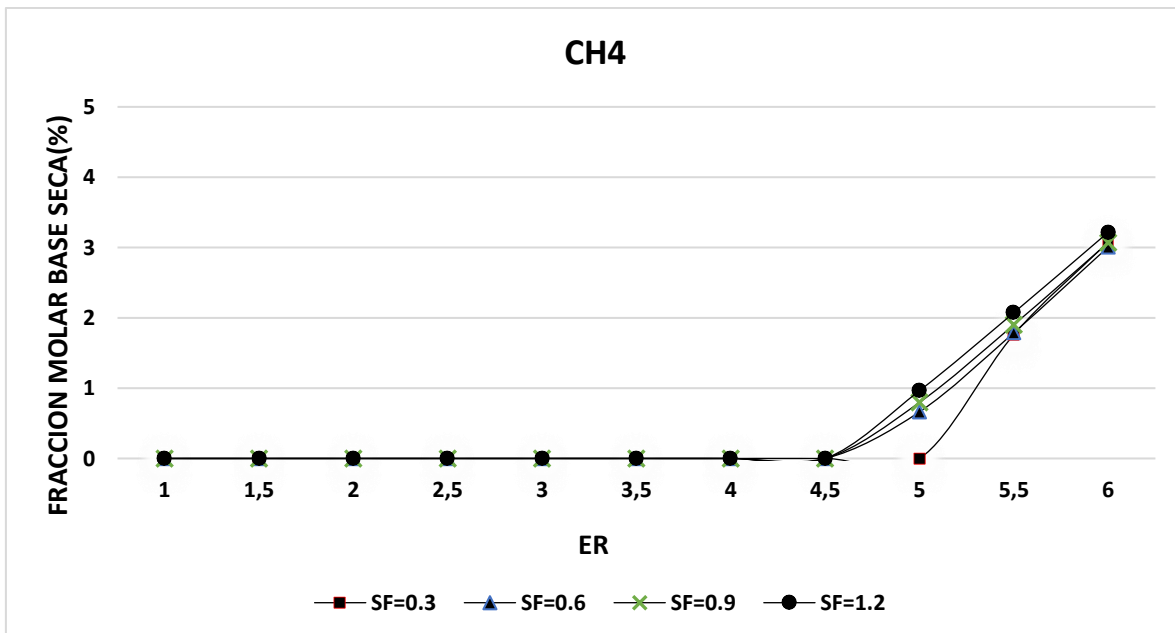


Gráfico 11. Fracción molar de CH₄

10.7. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

En este estudio se consideran tres tipos de métodos isoconversionales no isométricos para encontrar la energía de activación (FWO, KAS Y FRIEDMAN). Para determinar la descomposición cinética que ocurre en el proceso de pirólisis, usando grados de conversión (α) entre 0.1 y 0.8, estos representan valores de fracción de materia volatizada. Desarrollando cada una de las ecuaciones de los tres métodos, se obtienen los siguientes gráficos 10-13, para todos los casos a medida que se aumenta (α) la pendiente cambia y los valores de $1/T$ se hacen más pequeños.

En general, para los tres métodos isoconversionales se observa que al incrementar el grado de conversión tiende a disminuir la energía de activación debido a que la hemicelulosa y celulosa son más fáciles de volatilizar, en la (tabla 8) observamos la comparación de los métodos de acuerdo con los gráficos y se presenta la energía de activación para distintos grados de conversión.

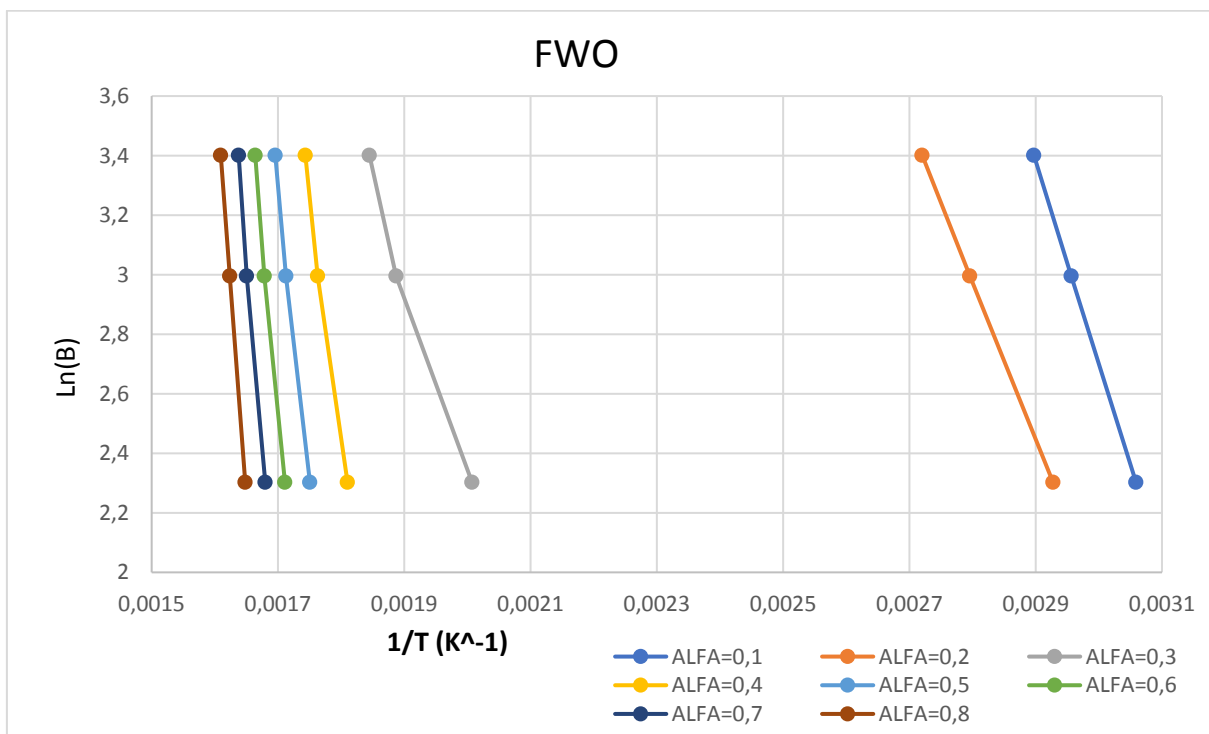


Gráfico 12. Líneas isoconversionales método FOW.

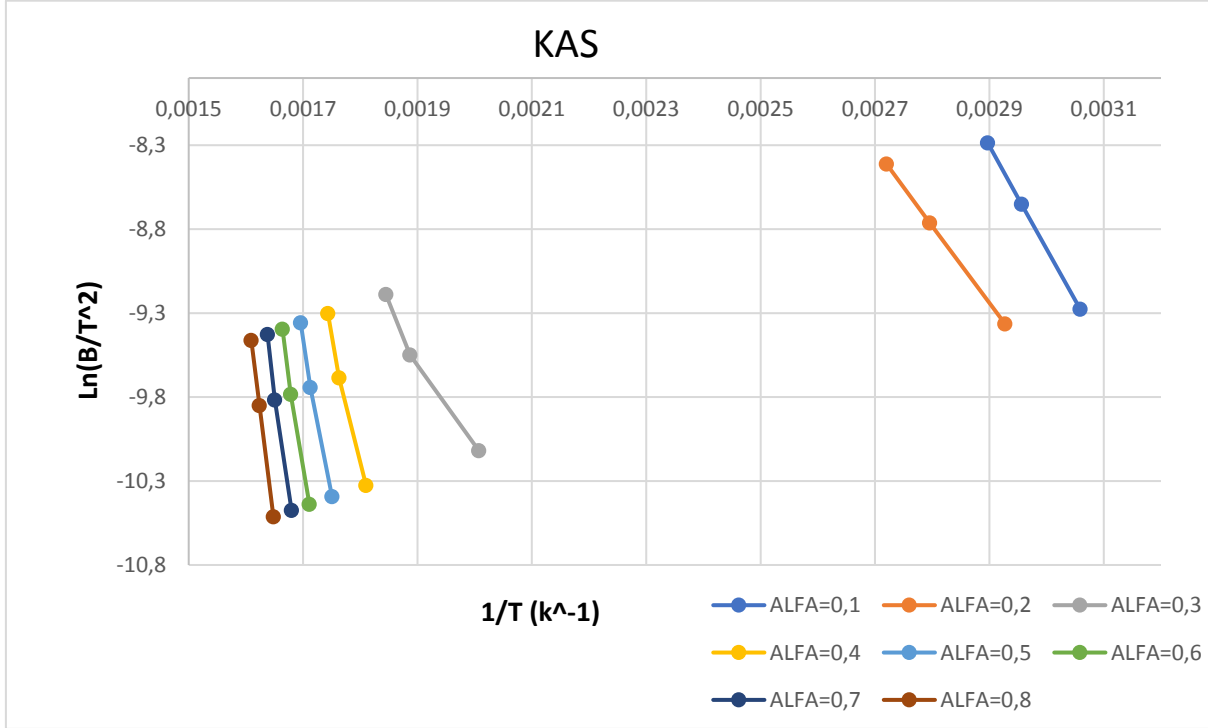


Gráfico 13. Líneas isoconversionales método KAS.

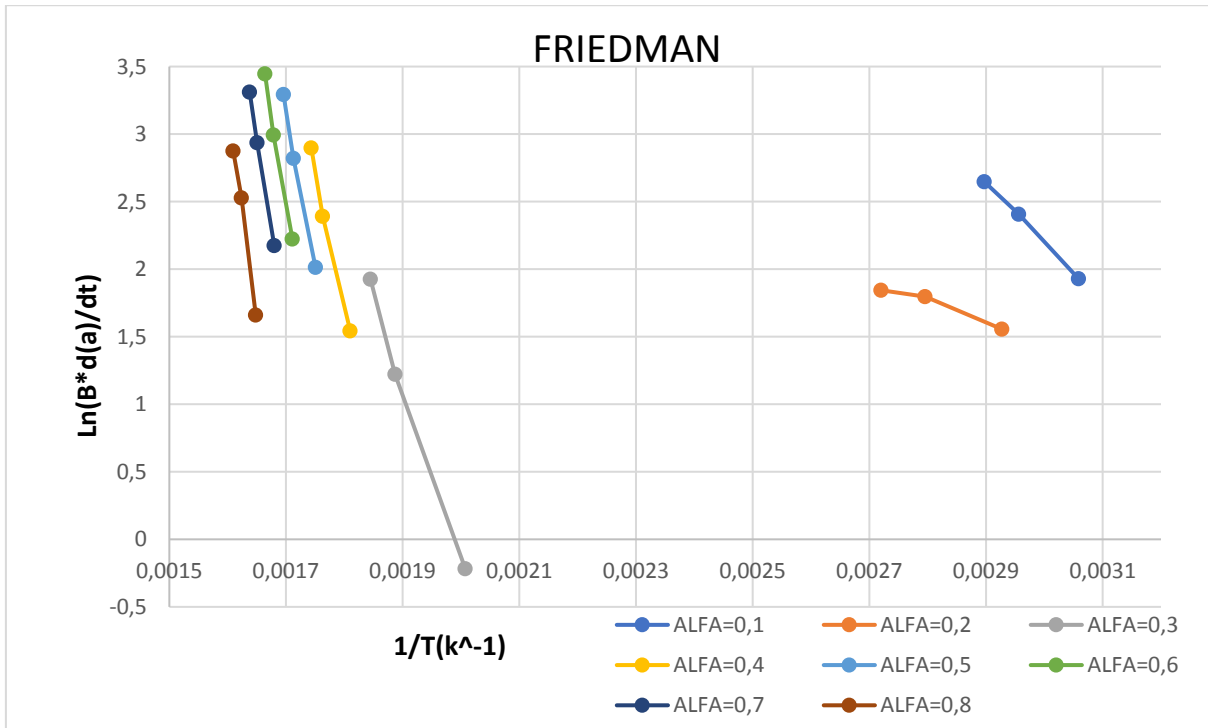


Gráfico 14. Líneas isoconversionales método FRIEDMAN.

Tabla 8. Energía de activación acorde al grado de conversión.

α	FWO		KAS		FRIEDMAN	
	R2	E(KJ/MOL)	R2	E(KJ/MOL)	R2	E(KJ/MOL)
0,1	0,9999851	53,66117	0,9999878	50,872545	0,998777356	37,142368
0,2	0,9999723	41,878383	0,9999789	38,173612	0,954942342	11,966526
0,3	0,9854771	51,687381	0,9800723	45,757982	0,994372399	107,37881
0,4	0,9925758	127,52235	0,9914897	124,80313	0,991741882	165,21044
0,5	0,9956647	155,96828	0,9951418	154,4358	0,995647552	190,96707
0,6	0,9952257	181,83954	0,9947219	181,44785	0,995073649	212,92247
0,7	0,9944404	202,81251	0,993905	203,34071	0,99905705	222,80347
0,8	0,9999992	224,42202	0,9999994	225,88712	0,991524902	264,57656

11. CONCLUSIONES.

- Comparando los resultados presentados por las gráficas 4 y 6. Se puede apreciar que el bagazo de bambú presenta buenas características de conversión termoquímica ya que en la prueba TGA presenta que para una temperatura de 380 °C el valor de α es 0.9 y para la prueba DTG presenta dos picos, el primero de vaporización y el segundo de activación de conversión de hemicelulosa principalmente acompañado por conversión de celulosa con un pico para una temperatura de 330 °C.
- Para un ER=5 y un SF=1.2. Se presenta el punto máximo de concentración de hidrógeno en base seca en el syngas con un 55%. Se demuestra que la concentración de hidrógeno tiene mayor sensibilidad al cambio de ER que el de SF sobre la concentración del hidrógeno. Además, aumentar el valor de ER lleva a que haya un aumento de la concentración del hidrógeno para valores de ER constante.
- Comparando los métodos isoconversionales usando datos no isotérmicos, se muestra que no hay diferencia en sus respectivas energías de activación para diferentes valores de α , lo que hace los tres métodos comparables. No sería adecuado realizar un promedio de la energía de activación para cada método ya que la pirólisis de biomásas es un proceso complejo que va cambiando en función de la temperatura y los reactivos son diferentes durante el aumento de temperatura. Se observa que para valores más altos de α la energía de activación aumenta, esto se debe a que hay menor cantidad de celulosa y hemicelulosa residual y se necesita mayor energía para descomponer la lignina y demás orgánicos complejos, y por supuesto el char residual que se va generando.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. p. v. D., «Trabajo didactico la energía,» *Instituto argentino de la energía*, p. 6, 2009.
- [2] G. R. K. A. m. M. Muhammad Shahbaz, «considering the effect og biomass energy consumption on economic growth: fresh evidence from BRICS region,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1442-1450, 2016.
- [3] K. R. A., «The next oil crisis looms large--and perhaps close,» *Science* 281(5380), pp. 1128-1131, 1998.
- [4] BP, «www.bp.com,» junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. [Último acceso: 10 mayo 2017].
- [5] A. M.-S. R. A. O. A. F. & O.-D. L. J. Devis-Morales, «Ocean thermal energy resources in Colombia.,» *Renewable Energy*, pp. 759-769., 2014.
- [6] L. J. M. N. y. F. O. S. Sandra Milena Yepes, «Valorización de residuos agroindustriales–frutas–en Medellín y el sur del valle del Aburrá, colombia.,» *VALORIZATION-FRUITS-IN*, A. W., pp. 1-10, 2008.
- [7] Z. G. M. & I. M. Anwar, «Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: a brief review.,» *Journal of radiation research and applied sciences*, pp. 163-173, 2014.
- [8] Catro y J., «Perspectivas de la demanda energetica global,» *Petrotecnica*, pp. 54-70, 2011.
- [9] G. Barbaro, «La biónica del bambú,» *Arquitectura del paisaje*, pp. 12-21, 2007.
- [10] U. a. peruanas, Escritor, *energías renovables*. [Performance]. silbao, 2015.
- [11] V. J. Jaramillo, *El ciclo global del carbono*, Mexico: Secretaria de medio ambiente y recursos naturales, 2004.
- [12] E. H. Hobsbawm, *Historia del siglo XX*, Mondadori: Grijalbo Mondadori, 1998.
- [13] R. P. M. M. Montero G, *Produccion de biomasa y fijación de Co2 por los bosques españoles.*, Madrid, 2005.
- [14] U. d. l. r. i. d. química. [En línea]. Available: <https://www.fing.edu.uy/iq/cursos/qica/repart/qica1/Combustibles.pdf>.
- [15] M. M. Martinez, *Combustion y quemadores*, Marcombo, 2005.

- [16] J. A.-H. B. B.-A. H. P.-J. J. d. J. V.-R. y. M. R.-U. Maribel Prado-Martínez1, «Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta,» *scielo*, 2012.
- [17] *. D. D. B. H. J.M.O. Scurlocka, «Bamboo: an overlooked biomass resource?,» *Biomass and bioenergy*, vol. 4, n° 19, pp. 229-244., 2000.
- [18] A. Kimaju, «VENTA DE BAGAZO DE CAÑA,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=8HzPQVCOfgw>. [Último acceso: 04 08 2017].
- [19] C. A. Estrada y A. Z. Menses, «Gasificación de biomasa para producción de combustible de bajo poder calorífico y su utilización en generación potencia y calor,» *Scientia et technica*, p. 25, 2004.
- [20] E. chile, «www.educarchile.com,» [En línea]. Available: <http://www.aprendeconenergía.cl/biomasa-una-antigua-fuente-de-energía-para-el-hombre/>. [Último acceso: 14 06 2017].
- [21] f. S. Norgues, *Energía de la biomasa*, Zaragoza: Universidad de zaragoza, 2010.
- [22] E. Martinez, V. W y S. M, «Simulación de un sistema de gasificación a un ciclo combinado,» *SCIELO*, pp. 141-146, 2006.
- [23] g. G. & F. C., «the brazilian energy initiative: Biomss contribution,» *paper presented at the bio-trade workshop.*, pp. 53-60, 2002.
- [24] M. Klug, «Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa,» *Revista de química PUCP*, p. 26, 2013.
- [25] Unalmed, «www.unalmed.edu.co,» [En línea]. Available: http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis_proximos.htm. [Último acceso: 14 06 2017].
- [26] S. c. escobar, «ESTIMACIÓN DE LOS GASES COMBUSTIBLES PRODUCTO DE LA GASIFICACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR Y DE LA CASCARILLA DE CAFE USANDO OXÍGENO Y OXÍGENO-VAPOR COMO AGENTE OXIDANTE,» *UNIVERSIDAD DE LOS ANDES*, p. 55, 2011.
- [27] F. Rodriguez y G. Ariza, «Gasificación adiabática del bagazo de caña de azúcar usando aire-vapor,» *REVISTA DE INGENIERIA*, vol. 33, p. 33, 2011.
- [28] J. Bonilla, M. Mayorga y A. Gaona, «MODELAMIENTO DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN ADIABÁTICA DE RESIDUOS DE ASADERO,» Bogotá, 2017.
- [29] R. C., «análisis termo gravimétrico del bagazo de caña de azúcar y de la cascarilla de café para la estimación de las constantes cinéticas en los procesos de gasificación.,» *universidad de los andes.*, 2009.
- [30] H. Yang y C. Zheng-, «Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,» *Elsevier*, 2007.
- [31] S. B. C. t. L. b. D. V. Angela Ines Cadena, «Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia,» *Revista de ingeniería*, (28), pp. 90-89, 2009.
- [32] C. M. Z. M. M. & D. I. apata, «Fuentes alternativas de generación de energía, incentivos y mandatos regulatorios: Fuentes alternativas de generación de energía, incentivos y mandatos regulatorios,» *bdigital portal de revistas Universidad Nacional*, pp. 55-63, 2005.

- [33] S. A. & d. V. J. I. Orrego, «Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios y secundarios de Colombia.» *In Valdivia: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales.*, 2001.
- [34] E. M. Pérez, «ENERGÍAS RENOVABLES SOSTENIBILIDAD Y CREACIÓN DE EMPLEO.» 2001.
- [35] C. Kahler Gonzales, «Carbón de Bambú y productos derivados.» *Desarrollo tecnologico y comercial*, 2014.
- [36] X. Londoño, «El bambú en Colombia.» *Biotecnologia vegetal*, vol. 3, p. 11, 2011.
- [37] N. Mejia, «Acuerdo de competitividad para la cadena productiva de la guadua.» Armenia, 2004.
- [38] D. C. E. Perez, «La cadena de la guadua en Colombia.» Agrocadenas Colombia, Colombia, bogota, 2003.
- [40] M. M. A. G. Javier Bonilla, «MODELAMIENTO DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN ADIABÁTICA DE RESIDUOS DE ASERRADERO USANDO MEZCLAS DE OXÍGENO-VAPOR.» bogota, 2017.
- [41] S. S. Mahmoud Sharara, «Thermogravimetric Analysis of Swine.» Scientific Research Publishing , 2014.