

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS
ALIMENTICIOS A TRAVÉS DE PROCESOS DE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA

LAURA TATIANA CORTES CAMACHO
ANGI PAOLA MORA CHACÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS
ALIMENTICIOS A TRAVÉS DE PROCESOS DE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA

LAURA TATIANA CORTES CAMACHO

ANGI PAOLA MORA CHACÓN

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

YESID JAVIER RUEDA ORDOÑEZ

Ingeniero Mecánico, PhD en ingeniería Química

Codirector

RAUL ANDRES SERRANO BAYONA

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

Dedicatoria

Principalmente agradecer a Dios y a la virgen María por todo lo que me han
brindado y me han ayudado a crecer como persona.

A mis padres, Yaneth y Marcos, por ser mi apoyo incondicional, por creer en mí,
por darme todo su amor, por el sacrificio que hicieron para poder darme estudio,
porque sin ellos no sería la mujer que soy ahora.

A mis hermanos, Erly, Elsy, Marcos, a mi princesa hermosa Valentina por ser una
de mis mayores motivaciones y a mis sobrinos Samuel, Oscar y Lina.

A ti Julián, que apareciste de la nada para ayudarme en mi crecimiento personal e
integral, por darme amor, hacerme feliz y apoyarme en todo.

A aquella persona que no está, pero me ayudo y enseñó mucho en la vida, gracias
en el cielo.

A mi director de proyecto, mi codirector y docentes a lo largo de mi carrera, por su
orientación y enseñanzas.

A mi amiga Mayra por su compañía, hermandad y buenos momentos.

A mis amigos, compañeros y demás personas que estuvieron durante mi
formación como profesional.

Angi Paola Mora Chacón

Dedicatoria

Quien tiene un porqué para vivir puede soportar casi cualquier cómo. FN
Primero gracias a Dios y a la virgen por darme cada día de los que me ha
permitido vivir, por darme todo absolutamente todo lo que me ha dado.
Son muchos los que se merecen esto, muchos de los cuales anhelaron estar aquí
hoy conmigo, mi abuelito José R , mi abuelita Rosa , mi papá , mi abuelito Tulio,
mi gran amigo Guerre, me encantaría con el alma que cada uno de ustedes
estuviera acá , es para ustedes.
Le agradezco eternamente a mi mamá Aura Camacho por darme y enseñarme
absolutamente todo, por estar ahí, levantarme cuando me caía , cuando hacía
algo mal, cuando estaba enferma, por enseñarme a volar siempre. Te amo ma. A
mi tía luz Duarte, porque ella me ha dado el cariño más sincero del planeta ,
porque me ha soportado absolutamente todo y sé que cada vez que pongo un pie
fuera de casa ella está conmigo en mi corazón.
A todos, mis tíos Luisa, Hilde, Ramón, Leo , Edil, Edgar , Enith, Clau, Bibi Gracias
por confiar en mí y por estar para mí sin importar qué, a mis hermanos, Julián,
Juan, Santi, los pitica, Dayis gracias. Juan D, Diego, los amo con mi alma entera y
quiero que lo logren todo en el planeta tierra, conseguiremos grandes cosas todos
juntos, nos tenemos los unos a los otros. Y al resto de mi familia Gracias. A la
familia Fuentes también les agradezco enormemente.
Gracias a la infinidad de docentes que hacen que este hoy aquí, en especial al
profe Bauti, Omar, Isnar ,D'croz y Yesid. Llevo mi corazón enaltecido por
pertenecer a la UIS y haberlos conocido.

Laura Tatiana Cortes Camacho

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1 PRELIMINAR	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	20
1.3 Estado del arte.....	20
1.3.1 Biomasa.	20
1.3.2 Biomasa de origen residual.....	21
1.3.3 Biomasa como fuente de energía	21
1.3.4 Combustión.....	22
1.3.5 Análisis termogravimétrico (TG).....	22
1.3.6 Energía de activación	23
1.3.7 Gasificación.	24
1.4 ENFOQUE DE LOS ANTECEDENTES	25
1.4.1 Pregunta de investigación.....	26
1.4.2 Hipótesis de la investigación.....	27
1.5 OBJETIVOS.....	27
1.5.1 Objetivo general.....	27
1.5.2 Objetivos específicos	27
2 METODOLOGÍA Y MATERIALES	28
2.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS A ANALIZAR	28
2.1.1 Torrefacción.....	29
3 CARACTERIZACIÓN.....	32
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 ANÁLISIS DE HUMEDAD	38
4.1.1 Resultados de humedad total de la muestra.....	43

4.2 TORREFACCIÓN	44
4.3 TRITURADO	48
4.4 PRUEBA DE VOLÁTILES.....	49
4.5 PRUEBA DE CENIZAS.....	50
4.6 CARBONO FIJO	52
4.7 PODER CALORÍFICO	53
4.8 TEMPERATURA ÓPTIMA DE TRABAJO PARA LA TORREFACCIÓN	58
4.8.1 Modelo termodinámico del calor requerido en el proceso.....	58
4.9 TAMIZADO	64
4.10 ANÁLISIS ELEMENTAL.....	65
4.11 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	70
4.11.1 Pruebas no isotérmicas torrefactadas.....	72
4.11.2 Pruebas isotérmicas torrefactadas.....	72
4.11.3 Pruebas isotérmicas masa seca sin torrefactor.	73
5 MODELOS MATEMATICOS.....	75
5.1 PROCESO EXPERIMENTAL	75
5.1.1 Resultados experimentales de las pruebas no isotérmicas torrefactadas. ...	76
5.1.2 Resultados experimentales en las pruebas isotérmicas de la masa seca sin torrefactor.....	80
5.1.3 Resultados experimentales en las pruebas isotérmicas torrefactadas	81
6 MODELOS CINETICOS.....	83
6.1 PRUEBAS NO ISOTÉRMICAS TORREFACTADAS	83
6.1.1 Modelo isoconversional.....	83
6.1.2 Modelo de reacciones paralelas.	88
6.2 PRUEBAS ISOTÉRMICAS DE LA MASA SECA SIN TORREFACTAR	95
6.2.1 Modelo isoconversional.....	95
6.3 PRUEBAS ISOTÉRMICAS DE LA MUESTRA TORREFACTADA	98
6.3.1 Modelo isoconversional	98
6.3.2 Modelo de reacciones paralelas..	101
7 GASIFICACIÓN	105

8 MODELO TERMODINAMICO DE LA GASIFICACION.....	108
8.1 RESULTADOS.....	114
9 CONCLUSIONES	116
10 RECOMENDACIONES	119
BIBLIOGRAFIA	120
ANEXOS	128

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modo de operación de la mufla.....	31
Figura 2. Alimentos puestos en la mufla antes del secado.	38
Figura 3. Alimentos después del secado de 16 horas.	39
Figura 4. Reducción de masa por secado de 16 horas.....	40
Figura 5. Porcentaje de reducción de masa por secado a 13 horas.	41
Figura 6. Porcentaje de reducción de masa por secado a 2 horas.	42
Figura 7. Análisis de la cebolla en un secado de 13 horas a 120 °C.	42
Figura 8. Representación porcentual del promedio de la reducción de masa de cada alimento.....	43
Figura 9. Muestras antes del proceso de secado y posterior torrefacción.	44
Figura 10. Muestras después de una torrefacción a 275 °C por 30 min.	45
Figura 11. Comportamiento de la biomasa torrefactada a 30 minutos.....	46
Figura 12. Comportamiento de la biomasa torrefactada a 15 minutos.....	48
Figura 13. Muestras después de la trituración.	49
Figura 14. Resultado final de la pruebas de cenizas en el crisol.	51
Figura 15. Representación gráfica de contenido de cenizas, volátiles y carbono fijo de la muestra analizada.	53
Figura 16. Calorímetro Parr 6200.	54
Figura 17. Secuencia del proceso para la toma del poder calorífico de la biomasa.....	55
Figura 18. Promedio de poderes caloríficos.	58
Figura 19. Esquema termodinámico del agua	59
Figura 20. Mediciones experimentales de calor obtenidas con DSC de la descomposición térmica de la caña de azúcar en atmosfera de nitrógeno.....	62
Figura 21. Representación de los valores del calor utilizado en el proceso.....	64
Figura 22. Muestras torrefactadas (30min-275°C) tamizadas en malla 70 para las	

pruebas de TGA.....	65
Figura 23. Muestra en base seca tamizada para el análisis elemental.	66
Figura 24. Resultados análisis elemental muestra en base seca y torrefactada ...	69
Figura 25. Analizador termogravimétrico TG 5500.....	71
Figura 26. Modelo gráfico de las pruebas no isotérmicas torrefactadas.	72
Figura 27. Modelo grafico de las pruebas isotérmicas torrefactadas.	73
Figura 28. Modelo grafico de las pruebas isotérmicas de la masa seca sin torrefactar.	74
Figura 29. Masa normalizada vs T en velocidades de 5°C/min, 10°C/min y 15°C/min en atmosfera de Nitrógeno.....	77
Figura 30. da/dt vs T en atmosfera de Nitrógeno.....	78
Figura 31. Masa normalizada vs T en velocidades de 5°C/min, 10°C/min y 15°C/min en atmosfera de Aire sintético.....	79
Figura 32. da/dt vs T en atmosfera de Aire sintético.....	80
Figura 33. Masa normalizada vs tiempo	81
Figura 34. Conversión vs tiempo de descomposición.....	82
Figura 35. Representación gráfica de $(\alpha \text{ vs } g(\alpha)/g(0,5)); \beta$	86
Figura 36. Linealización de la ecuación de la tasa de conversión en función de la inversa de la temperatura.	87
Figura 37. Representación teórica y experimental a diferentes temperaturas de calentamiento.....	88
Figura 38. Representación modelo experimental y teórico α vs T.	91
Figura 39. Tasa de conversión vs Temperatura.....	91
Figura 40. Representación modelo experimental y teórico α vs T.	92
Figura 41. Tasa de conversión vs Temperatura.....	93
Figura 42. Representación modelo experimental y teórico α vs T.	94
Figura 43. Tasa de conversión vs Temperatura.....	94
Figura 44. Representación gráfica de las diferentes funciones de $g(\alpha)/g(0,5)$	96
Figura 45. Representación gráfica α vs tiempo del modelo isoconversional de cada	

temperatura.....	98
Figura 46. Representación gráfica de las diferentes funciones de $g(\alpha)/g(0,5)$	99
Figura 47. Conversión vs tiempo para una temperatura de 600(°C).....	100
Figura 48. Conversión vs tiempo para una temperatura de 600(°C).....	101
Figura 49. Representación de conversión vs tiempo.	102
Figura 50. Representación de la tasa de conversión vs el tiempo.....	103
Figura 51. Resultados modelo de reacciones paralelas a 700°C.	103
Figura 52. Representación conversión vs tiempo.	104
Figura 53. Representación de la tasa de conversión vs el tiempo.....	104
Figura 54. Banco de pruebas de gasificación.	106
Figura 55. Comportamiento de la biomasa en el proceso de gasificación.	109
Figura 56. Representación de α teórico y experimental para una velocidad de 15°C/min.	141
Figura 57. Representación de α teórico y experimental para una velocidad de 10°C/min.	141
Figura 58. Representación de α teórico y experimental para una velocidad de 5°C/min.	142
Figura 59. Desperdicio de residuos alimenticios de la sección de comedores. ...	151
Figura 60. Depósito final de los desperdicios alimenticios de la sección de comedores y cafetería de bienestar.	152

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Proporciones de residuos para las muestras.	29
Tabla 2. Distribución de las pruebas de torrefacción.	31
Tabla 3. Humedad en la proporción de masa utilizada.	44
Tabla 4. Resultados de las pruebas de torrefacción en un tiempo de 30 minutos.	46
Tabla 5. Resultados de las pruebas de torrefacción en un tiempo de 15 minutos.	47
Tabla 6. Resultados de la prueba de volátiles.	50
Tabla 7. Resultado prueba de cenizas.	52
Tabla 8. Pruebas de calorimetría a las pruebas torrefactadas de 30 minutos.	56
Tabla 9. Pruebas de calorimetría a las pruebas torrefactadas de 15 minutos.	57
Tabla 10. Resultados del análisis termodinámico de secado y torrefacción.	63
Tabla 11. Resultados obtenidos teórica y experimentalmente.	67
Tabla 12. Valores de análisis elemental de la literatura ya existente.	68
Tabla 13. Resultados de análisis elemental muestra torrefactada.	68
Tabla 14. Comparación de resultados de análisis elemental.	70
Tabla 15. Modelos de reacción.	84
Tabla 16. Resultados globales de los parámetros cinéticos.	88
Tabla 17. Resultados Pseudocomponentes $\beta = 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	90
Tabla 18. Resultados pseudocomponentes $\beta = 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$	92
Tabla 19. Resultados pseudocomponentes $\beta = 15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	93
Tabla 20. Resultados modelo isoconversional.	97
Tabla 21. Resultados factor pre exponencial para las diferentes temperaturas.	97
Tabla 22. Resultados modelo isoconversional.	99
Tabla 23. Resultados modelo de reacciones paralelas a 600°C	102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Procedimiento termodinámico para la obtención del calor requerido en el proceso	128
Anexo B. Procedimiento del modelo termodinámico de la gasificación	129
Anexo C. Modelo Isoconversional de las pruebas no isotérmicas torrefactadas .	132
Anexo D. Modelamiento de reacciones paralelas pruebas no isotérmicas torrefactadas	143
Anexo E. Modelo isoconversional de las pruebas isotérmicas de la masa seca sin torrefactar	145
Anexo F. Estudio de campo de la seccion de comedores de la universidad industrial de santander.....	151

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS ALIMENTICIOS A TRAVÉS DE PROCESOS DE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA.*

AUTORES: LAURA TATIANA CORTES CAMCHO, ANGI PAOLA MORA CHACON.**

PALABRAS CLAVE: Termogravimetría, biomasa, gasificación, torrefacción.

DESCRIPCIÓN:

Hoy en día, la investigación de biomasa es fundamental en la búsqueda de energías sostenibles y, por lo tanto, los residuos orgánicos alimenticios son una fuente potencial para este propósito. La presente investigación tiene como objetivo, aprovechar y estudiar energéticamente los residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica, como la torrefacción. Se realizó la caracterización de cada residuo orgánico alimenticio seleccionado, para definir parámetros tales como humedad, contenido de materia volátil, cantidad de cenizas y de carbono fijo.

Las muestras recibieron un pre tratamiento de secado y posteriormente se llevó a cabo la torrefacción en un rango de temperaturas entre 200°C y 275°C con tiempos de residencia de 15 min y 30 min. Se midió el poder calorífico de las muestras torrefactadas determinando que la condición óptima es a una temperatura de 275 °C a un tiempo de 15 min.

Seguidamente, se realizaron pruebas de termogravimetría y análisis elemental de las muestras, incluyendo las que no fueron sometidas a proceso de torrefacción (en base seca) para así realizar la comparación correspondiente de que tan beneficioso es realizar el tratamiento térmico a la biomasa. El modelo matemático de las muestras una vez realizada la termogravimetría en condiciones isotérmicas y no isotérmicas nos permitió determinar la energía de activación y el factor pre exponencial para poder caracterizar y simular el comportamiento de la biomasa, también se realizó un modelo matemático para el proceso de gasificación que se podría llegar a cabo con la biomasa utilizada.

* Trabajo de grado

** Facultad físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Yesid Javier Rueda Ordoñez. Raúl Andrés Serrano Bayona.

ABSTRACT

TITULO: ESTUDY OF THE USE OF ORGANIC FOOD WASTE THROUGH THERMAL DECOMPOSITION PROCESSES.*

AUTORES: LAURA TATIANA CORTES CAMACHO, ANGI PAOLA MORA CHACÓN**

PALABRAS CLAVE: Termogravimetry, biomass, gasification, roasting.

DESCRIPTION:

Currently, biomass is a fundamental part of research in the search for sustainable energy, thus organic food waste is a potential source for this purpose. The aim of this research is to study energetically organic food waste through thermal decomposition processes, such as roasting.

The characterization of each selected organic food residue was performed, to define parameters such as moisture, volatile matter, ash and fixed carbon contents. The samples received a drying treatment and subsequently were roasted in a range of 200°C to 275°C between 15 min and 30 min. The heating value of the roasted samples were measured in order to determine that the most optimal condition is at a temperature of 275°C a residence time of 15 min. Then thermogravimetric tests and elemental analyses of the samples were carried out, including those that were not subjected to roasting process (dry basis) to make the corresponding comparison of how beneficial it is to perform the biomass heat treatment.

The mathematical model of the samples once the thermogravimetric was performed under isothermal and non-isothermal conditions allowed us to determine the activation energy and the pre-exponential factor to be able to characterize and simulate the behavior of the biomass, a mathematical model for the gasification process was also made.

* Bachelor Thesis

** Facultad físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Yesid Javier Rueda Ordoñez. Raúl Andrés Serrano Bayona.

INTRODUCCIÓN

A inicios del siglo pasado la biomasa (madera), era parte importante del desarrollo económico, sin embargo, con la implementación del petróleo como fuente de energía y materia prima para la industria, esta pasó a un segundo plano.

Hoy en día la biomasa tiene su auge gracias a su origen de energía renovable, precios inestables del petróleo y disminución en el daño al medio ambiente siendo un gran potencial para la creación de biocombustibles. Los residuos sólidos urbanos, son una de las principales fuentes de biomasa residual, en el cual predomina la basura doméstica. Incluyen residuos biodegradables, tales como residuos y envasado de alimentos. La mayoría de los residuos sólidos urbanos se incineran para producir electricidad.¹

Según la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO), un tercio de la producción de alimentos destinados al consumo humano se pierde o se desperdicia, lo que significa que 1300 millones de toneladas de comida van a parar a la basura.²

¹ SالدARRIAGA, Juan. Avances en el modelo de la combustión de biomasa en sputed bed cónico [en línea]. Tesis Doctoral. Leioa. Universidad el País Vasco. Facultad de Ciencia y tecnología. Departamento de Ingeniería Química, 2015. 17p. [Consultado el 20 de mayo de 2019]. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/0c69/f08cebfd51995cb04e52b23c4798e1b88cfa.pdf>

² ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Pérdida y desperdicio de alimentos [en línea]. [Consultado: 7 de octubre de 2019]. Disponible en : <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/es/>

1 PRELIMINAR

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia 9,76 millones de toneladas de comida se pierden y desperdician según información del Departamento Nacional de Planeación (DNP). Del total el 64% (6,24 millones) son pérdidas que reportan las etapas de producción, post-cosecha, almacenamiento y procesamiento industrial, mientras que el 36% restante se pierde en la distribución, venta y hogares³. Hoy en día, la investigación de biomasa es fundamental en la búsqueda de energías sostenibles y, por lo tanto, los residuos orgánicos alimenticios son una fuente potencial para este propósito.

Se tiene como ejemplo local la situación presentada en la sección de comedores estudiantiles de la Universidad Industrial de Santander donde se presenta un índice de desperdicio de comida de 124,4 kg por semana, lo que lleva a un total de 497, 6 kg mensuales, que son totalmente desechados.

La presente investigación tiene como objetivo, aprovechar y valorizar energéticamente los residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica, tal como la torrefacción.

³ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Colombianos botan 9,76 millones de toneladas de comida al año. [En línea]. Bogotá D.C.. 2016. (Recuperado en 30 septiembre 2019.) Disponible en <https://www.dnp.gov.co/Paginas/colombianos-botan-9,76-millones-de-toneladas-de-comida-al-a%C3%B1o.aspx>

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Actualmente el mayor porcentaje de energía que se consume a nivel global es proveniente del petróleo, carbón, gas licuado del petróleo y gas natural; estos provienen de fuentes no renovables y en su explotación se genera un impacto ambiental desfavorable. Además, su uso emite grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), principal responsable del efecto invernadero.

Por lo tanto, es necesario encontrar alternativas que reduzcan el daño ambiental y adoptar energías más sostenibles, la biomasa puede suplir parte de esa demanda y así reducir la generación de desechos orgánicos.

Por la cantidad de desperdicios que se generan diariamente a nivel global se hace necesario estudiar de qué forma se pueden utilizar los residuos alimenticios de comida energéticamente en pro de cualquier comunidad.

1.3 Estado del arte

1.3.1 Biomasa. Se entiende como biomasa a la fracción biodegradable de productos, desechos y todo aquel residuo proveniente de la agricultura y de las diferentes industrias. La biomasa se puede utilizar para la producción de energía, biocombustibles y algunos productos químicos alternativos (gas, petróleo y carbón)⁴ Existen diferentes materias primas que se derivan de los materiales de

⁴ PALACIOS, Carolina. Estudio de la viabilidad de una empresa gestora de terrenos en el municipio de Terrassa. Máster universitario en ingeniería de organización. Barcelona [en línea]. Universitat Politècnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2014. 38 p. [Consultado el 20 de mayo de 2019]. Disponible en <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/20973>

biomasa, como los lípidos, que son moléculas ricas en energía, derivados de plantas no leñosas y algas; los azúcares y almidones se obtienen de alimentos como los granos de maíz y actúan como hidratos de carbono, de los cuales se pueden producir biocombustibles de primera generación.⁵

1.3.2 Biomasa de origen residual. La biomasa está formada por materiales orgánicos sobrantes de procesos industriales, líquidos agrícolas, residuos de construcción y residuos sólidos urbanos en el cual predomina la basura doméstica, donde se incluyen residuos biodegradables, tales como residuos de alimentos y envasado de alimentos. Las principales fuentes de residuos no leñosos incluyen los residuos de papel, restos líquidos de la producción del papel y la fabricación textil. Las fuentes de materiales de desecho leñoso incluyen subproductos de aserraderos como serrín y virutas, los puntos de corte en la fabricación de muebles y productos de madera compuesta que contienen resinas y adhesivos.⁶

1.3.3 Biomasa como fuente de energía La composición de la biomasa varía según su procedencia. Generalmente está constituida en base seca por carbono (45-52%), hidrógeno (4-7%) y oxígeno (42-50%) con cantidades menores de nitrógeno y azufre. Contiene gran cantidad de materia volátil (70-80%) y cenizas entre (0.5-5%), siendo el resto carbono fijo. La humedad contenida puede llegar hasta 50% y el poder calorífico oscila aproximadamente para un valor máximo de **22 MJ/kg** y un valor mínimo de **15 MJ/kg**⁷.

⁵ SالدARRIAGA, Juan. Avances en el modelo de la combustión de biomasa en sputed bed cónico [en línea]. Tesis Doctoral. Leioa. Universidad el País Vasco. Facultad de Ciencia y tecnología. Departamento de Ingeniería Química, 2015. 11p. [Consultado el 20 de mayo de 2019]. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/0c69/f08cebfd51995cb04e52b23c4798e1b88cfa.pdf>

⁶ Ibíd., p.17.

⁷ ARAUZO, J et al. Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. En: Boletín del Grupo Español del Carbón [en línea]. Zaragoza : Universidad de Zaragoza, septiembre, 2014, nro.

1.3.4 Combustión. La combustión involucra tanto aspectos físicos como químicos de alta complejidad. Los procesos de combustión dependerán de las propiedades del combustible como de la aplicación de la combustión, la cual involucra etapas de secado, pirolisis y combustión. Se realiza en un reactor el cual se opera en continuo o discontinuo, y la adición de aire se puede llevar de manera natural o forzada. La combustión discontinua es usada en unidades a pequeña escala, utilizando corriente natural. Las unidades medianas y a gran escala son siempre continuas y utilizan corrientes de aire forzado.⁸. Se ha encontrado que la biomasa muestra diferentes características de combustión de acuerdo a su composición elemental, produciéndose una serie de reacciones químicas, oxidándose principalmente el carbono a dióxido de carbono, y el hidrógeno a agua.

La biomasa ofrece ventajas importantes como materia prima para la combustión, debido a la alta volatilidad del combustible y la alta reactividad tanto del combustible resultante. La reactividad de los materiales carbonosos se ha estudiado mediante técnicas de termogravimetría isotérmicas y no isotérmicas.

1.3.5 Análisis termogravimétrico (TG) Termogravimetría (TG) es una técnica en la que la masa de la muestra es controlada respecto al tiempo o la temperatura, en una atmósfera determinada.

Esta técnica ofrece la determinación de composiciones de material. Específicamente, los análisis termogravimétricos han sido utilizados para el estudio de las reacciones primarias en la descomposición de materiales sólidos y líquidos. Con la termogravimetría se analizan procesos de desorción, adsorción y

33. 2 p. [Consultado: 30 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5111506>

⁸ SALDARRIAGA, Juan. Avances en el modelo de la combustión de biomasa en sputed bed cónico [en línea]. Tesis Doctoral. Leioa. Universidad el País Vasco. Facultad de Ciencia y tecnología. Departamento de Ingeniería Química, 2015. 36 p. [Consultado el 20 de mayo de 2019]. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/0c69/f08cebfd51995cb04e52b23c4798e1b88cfa.pdf>

reacciones de descomposición en un ambiente de gas inerte o en presencia de oxígeno.⁹

1.3.6 Energía de activación. Para que se lleve a cabo una reacción química es necesario que las moléculas de los reactivos colisionen entre sí, para esto es necesario que las moléculas choquen con la orientación adecuada y con la energía suficiente. Una reacción química es consecuencia de la reorganización de los átomos de los reactivos para dar lugar a los productos. Este proceso no se lleva a cabo directamente, sino a través de una asociación transitoria de las moléculas denominado complejo activado. A la energía necesaria para que los reactivos formen el complejo activado se le llama energía de activación, E , y representa la barrera de energía que han de salvar las moléculas para que tenga lugar la reacción.¹⁰

La ecuación de Arrhenius $K = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$, relaciona la constante de velocidad con la temperatura, para una determinada reacción química; en forma logarítmica, $\ln[K(T)] = \ln A - \frac{E}{RT}$, teniendo así que la energía de activación es:

$$E1 = R * T * \{\ln A - \ln[K(T)]\} \quad (1)$$

En donde:

E es la energía de activación, A es el factor pre-exponencial, R es la constante universal del gas, T es la temperatura absoluta.

⁹ RODRÍGUEZ, Ellen y VILLEGAS, Ernesto. Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. En: Métodos y materiales [en línea] .San José: Universidad de Costa Rica, junio-julio, 2012, nro. 2, 26p. [consultado 30 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/13470/13366>

¹⁰ HIRUBILIA BUSCADOR EN LINEA: Energía De Activación. Ecuación De Arrhenius. Catálisis [en línea]. Hiru.eus. [Consultado: 29 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://www.hiru.eus/es/quimica/energia-de-activacion-ecuacion-de-arrhenius-catalisis>

1.3.7 Gasificación. La gasificación de la biomasa es una tecnología de más de cien años de antigüedad. Hoy es vista como una alternativa a los combustibles convencionales; es un proceso térmico en el cual combustibles sólidos, tales como la madera (palma africana), residuos orgánicos alimenticios, agrícolas y otros tipos de biomasa seca, son convertidos en un gas combustible que puede ser quemado en motores de combustión interna, turbinas o en equipos de producción de calor y energía.¹¹

- **Proceso de la gasificación**

El proceso de gasificación se realiza con un agente gasificante (aire, oxígeno puro y/o vapor de agua) donde a temperaturas superiores a las de pirolisis ocurren una serie de reacciones, este tener carácter auto térmico o requerir aportes suplementarios de energía para llevarse a cabo. El tipo de reactor empleado, además de influir en la composición y calidad del gas de gasificación, viene determinado por las características de la biomasa a gasificar: tamaño de partícula, humedad y composición.¹²

- **Gas producido de gasificación de biomasa y sus constituyentes:**

El gas generado después de un proceso de gasificación contiene una mezcla de gases combustibles y no combustibles, agua, polvo y compuestos de sulfuro como (H_2S) y compuestos de nitrógeno como (NH_3, HCN) que son indeseables por generar condensados corrosivos y contaminantes en los gases de escape como los NO_x que son grandes contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida. Una característica general de los gases combustibles producto de la gasificación de biomasa es el valor de su poder calorífico inferior (LHV) que oscila entre 4,5 y 5

¹¹ ARAUZO, J et al. Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. En: Boletín del Grupo Español del Carbón [en línea]. Zaragoza : Universidad de Zaragoza, septiembre, 2014, nro. 33. 4 p. [Consultado: 30 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5111506>

¹² Ibíd., p.4.

(MJ/m^3) este valor es menor al poder calorífico de los hidrocarburos de uso común en la industria y en el transporte.¹³

1.4 ENFOQUE DE LOS ANTECEDENTES

- En la década de los 70s, una parte importante de los biotecnólogos de todo el mundo enfocaron sus investigaciones hacia la utilización y aprovechamiento de los residuos agroindustriales para la producción de compuestos útiles como insumos de otros procesos industriales. Los primeros años, la prioridad se enfocó a la generación de productos con valor agregado, años más tarde se sumó la prioridad de utilizar los residuos para reducir el impacto ambiental que ocasiona su disposición, y a partir del presente siglo la prioridad está enfocada a la producción de bioenergéticos y a la elaboración de nuevas formulaciones de alimentos para animales. Si bien el residuo más utilizado para la producción de bioetanol es el bagazo de caña de azúcar, en la literatura se encontraron una gran variedad de residuos que se han estudiado en diversas partes del mundo para los mismos fines, como, por ejemplo: - Aceite de palma y racimos vacíos de soporte la fruta; pulpa, cáscara y tallo de la flor del plátano; En Colombia el mosto resultante de la elaboración de vinos; maíz y cortes de tallos de café.¹⁴
- En la universidad de Medellín en el año 2015 se desarrolló un proyecto de Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido, donde se logró desarrollar un método termogravimétrico, el cual permite un

¹³ Ibíd., p.5.

¹⁴ SAVAL, S. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. En: Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A.C. [En línea]. México D.F. , 2012,nro.2. 15 p. [Consultado: 30 de septiembre de 2019]. Disponible en https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista_2012_V16_n2.pdf#page=14

mejor análisis de la materia prima, ya que se alcanzó a optimizar la rampa de calentamiento con el fin de realizar una degradación adecuada de los tres componentes (hemicelulosa, celulosa y lignina). ¹⁵

- En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la facultad tecnológica en el año 2017 se llevó a cabo la investigación de evaluación del potencial como biocombustible de los residuos orgánicos alimentarios secos obtenidos en el secador solar de la universidad se obtuvo como conclusión que uno de los mayores poderes caloríficos fue el de la muestra color naranja (residuos de papaya, zanahoria, tomate, naranja, pimentón, entre otros) debido a su composición elemental, ya que el 40% de la muestra es carbono. Sin embargo, vemos que la mayor cantidad de calor liberado se produce en la muestra café (con la cantidad mayor de oxígeno en su análisis elemental), lo que puede 69 indicar que el equilibrio entre carbono y oxígeno en una muestra puede interferir al momento de liberar calor. Ahora bien, el potencial energético de los residuos orgánicos alimentarios como biocombustible es bueno dependiendo de su aplicación.¹⁶

1.4.1 Pregunta de investigación. ¿Qué efecto tiene la torrefacción como pre tratamiento térmico en la valorización energética de residuos alimenticios para procesos de combustión y gasificación?

¹⁵ GIRALDO, Natalia y MONTROYA, Natalia. Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido [en línea]. Tesis de Grado para Optar por el Título de Ingeniera Ambiental. Medellín. Universidad de Medellín. Facultad de Ingeniería 2016. [Consultado: 30 de septiembre de 2019]. Disponible en : <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/2167>

¹⁶ ALBA, Oscar y CAÑÓN, Manuel. Evaluación del potencial, como biocombustible, de los residuos orgánicos alimentarios secos obtenidos en el secador solar de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas [en línea]. Tesis de Grado Ingeniería Mecánica. Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. 2017. 68 p. [Consultado: 5 de abril de 2019]. Disponible en : <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13409>

1.4.2 Hipótesis de la investigación. Por medio de tratamientos térmicos aplicados a residuos de comida que cotidianamente se procesan en los hogares, es posible producir y obtener gas combustible.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general. Investigar y valorizar energéticamente los residuos alimenticios aplicando procesos de torrefacción y su aplicación en la gasificación.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas (análisis próximo, análisis elemental, poder calorífico, perfil de composición térmica) de los residuos secos y torrefactados en condiciones de laboratorio, siendo éstas en los porcentajes de masa de volátiles, cenizas y carbono fijo.
- Determinar la energía liberada en la combustión del proceso seco y torrefactado.
- Proponer un modelo matemático de la gasificación de esta biomasa como partícula, por medio del modelo cinético basado en la ley de Arrhenius.

2 METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS A ANALIZAR

Se eligieron los alimentos más consumidos en Colombia, entre cereales, frutas, verduras y carnes. Los productos de mayor consumo entre los colombianos y la propia industria son arroz, cebolla cabezona, papa, panela, maíz, algodón, etc.¹⁷. Con respecto a la carne el consumo lo lidera la carne de res y luego la carne de pollo. Los colombianos consumen alrededor de 40 kilos de fruta, cifra muy baja teniendo en cuenta el gran potencial que tiene el país en producción de la misma.¹⁸ En base al proyecto ¹⁹ “Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos- caracterización y modelado matemático del proceso” se trabajó con las siguientes proporciones (tabla (1)):

¹⁷ REDACCIÓN ECONOMÍA. Plan de Ordenamiento Agropecuario se inicia con el arroz [en línea]. En: *El Espectador*. Bogotá, Marzo 14 de 2019. [Consultado el 18 de junio de 2019]. Disponible en <https://www.elespectador.com/economia/plan-de-ordenamiento-agropecuario-se-inicia-con-el-arroz-articulo-845055>

¹⁸ REDACCIÓN SALUD. Colombia produce pero no consume [en línea]. En: *El Espectador*. Bogotá, Octubre 20 de 2013. [Consultado el 18 de febrero de 2019]. Disponible en <https://www.dinero.com/pais/articulo/consumo-frutas-verduras-colombia/186472>

¹⁹ ORTIZ MIER, Nubia Lizeth y VELANDIA ROJAS, Diego Fernando. Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos- caracterización y modelado matemático del proceso. Tesis de Grado Ingeniería Mecánica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2018. 30 p.

Tabla 1. Proporciones de residuos para las muestras.

Elemento	Cantidad (g)
Maíz	4,74
Arroz	1,62
Pollo	1,31
Carne	0,73
Cebolla	0,8
Papa	0,8
Total	10

La preparación de las muestras se llevó a cabo a condiciones atmosféricas de Bucaramanga (presión atmosférica 680 mm Hg, temperatura del agua 97°C), a los alimentos no se les agregó sal, condimentos o aceites. Su preparación se realizó en un recipiente metálico, directamente a la llama de una estufa de gas natural, cada alimento se preparó por separado al vapor, para esto se utilizó una malla metálica casera y se tapó por un tiempo de 20 min cada alimento.

2.1.1 Torrefacción. La torrefacción, es un proceso de pirolisis leve que se lleva a cabo en el rango de temperaturas de los 200°C a 300°C en ausencia de oxígeno. Este tratamiento térmico se realiza con el fin de mejorar la densidad energética de la biomasa, reducir la masa, así como la eliminación de H_2O , O_2 y CO_2 de esta. También, mejora las propiedades hidrofóbicas, reduciendo la absorción de humedad, siendo más sencillo el almacenamiento por periodos

largos de tiempo y reduciendo la descomposición. Asimismo, reduce su relación de oxígeno a carbón (O/C) y de hidrogeno a carbón (H/C) aumentando el contenido de carbón relativo de la biomasa.²⁰

Entre las principales ventajas se encuentra la reducción de tamaño y manejo de la biomasa, combustión más limpia con poco ácido en el humo, aumento en el poder calorífico del gas producto de la gasificación y reducción de la producción de alquitranes durante la gasificación. La disminución de la energía relativa presente en la biomasa producto de la liberación de volátiles de la hemicelulosa, se ve compensada por la disminución de los costos de transporte, almacenamiento y procesamiento de esta.

La descomposición térmica de torrefacción en la presente investigación, se realizó en las temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C y 275°C, en tiempos de 15 minutos y 30 minutos, las pruebas se distribuyeron como se muestra en la tabla (2).

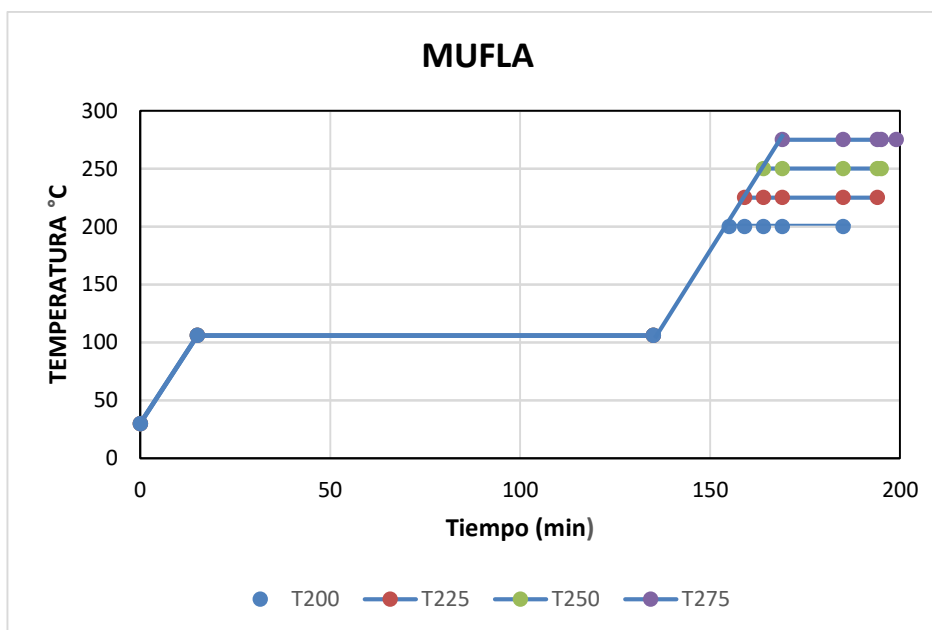
Para los procesos de secado y torrefacción se utilizó un horno mufla (Terrígeno. modelo D8) de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica en el laboratorio de combustión. Esto funciona mediante programación y se trabajaron en rampas de intervalos de tiempo y temperatura como lo muestra la figura (1).

²⁰ BASU. Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, "Practical Design and Theory". 1 ed. Kidlington.: Elsevier, 2010. 364p. [Consultado el 12 de junio de 2019]. Disponible en https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=QSybUSdkikC&oi=fnd&pg=PP1&dq=BASU.+Prabir.+Biomass+Gasification+and+Pyrolysis,+%E2%80%9CPactical+Design+and+Theory%E2%80%9D.+1+ed.+Kidlington.:+Elsevier,+2010.+364p.+ISBN+978-0-12-374988-8&ots=Vg0n2bGsfe&sig=SpZ8C1Vvnqf77FG50dpkpBqdtPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Tabla 2. Distribución de las pruebas de torrefacción.

Temperatura(°C)	N° De Prueba	Tiempo (Min)	
200	1	15	30
	2		
	3		
225	1		
	2		
	3		
250	1		
	2		
	3		
275	1		
	2		
	3		

Figura 1. Modo de operación de la mufla.



3 CARACTERIZACIÓN

- **Contenido de humedad:** La humedad en la biomasa es un compuesto que no es aprovechable energéticamente, por lo tanto, es importante mantener los niveles de humedad al mínimo. En general, el contenido de humedad en la biomasa afecta la calidad del gas y además reduce la energía obtenible, debido a que se requiere energía para vaporizarla. El contenido de humedad se determinó utilizando la norma ASTM E-1756-08²¹, que da el método estándar para la determinación de sólidos totales. Aclarando que para aplicar esta norma las muestras hayan sido preparadas bajo la norma ASTM E-1757. Tomando así la norma ASTM E-1756 como guía. Por norma para el secado se necesita:
 - ✓ Balanza analítica, sensible a 0,1 mg
 - ✓ Horno mufla
 - ✓ Desecador
- **Triturado:** Es recomendable tener la biomasa triturada para los experimentos posteriores debido a que disminuimos el tamaño de muestra y con ello el porcentaje de error, para el triturado de las muestras se utilizó un molino de cuchillas Elite Cuisine modelo ETS-630B ubicado en el laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

²¹ ASTM E1756 – 08. Método de prueba estándar para la determinación de sólidos totales en biomasa. [en línea]. (aprobada 2015). [consultada: 15 de octubre de 2018] disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08(2015))

- **Contenido de volátiles:** Se usó la norma ASTM E872-82²², que regula el método de prueba para materia volátil en el análisis de combustibles de partículas de madera.
- **Contenido de cenizas:** Las cenizas son compuestos inorgánicos que pueden actuar como catalizadores propiciando las reacciones químicas en procesos termoquímicos. Sin embargo, estas pueden ocasionar problemas de operación, relacionados con la posibilidad de fundición de este residuo, lo cual ocasiona obstrucción de los equipos. Se usó la norma ASTM E-1755-01²³.
- **Contenido de carbono fijo:** Es la diferencia resultante de las pruebas de contenido de volátiles y cenizas.

$$\%C_f = 100 - \%V - \%a \quad (2)$$

Donde $\%C_f$ es el porcentaje de carbono fijo, 100 es el total de la masa inicial de la muestra en seco, $\%V$ es el contenido de volátiles y $\%a$ son las cenizas

- **Poder calorífico:** El poder calorífico se define como el calor liberado cuando un combustible se quema por completo en un proceso de flujo estacionario; este puede ser expresado de dos formas: poder calorífico inferior (PCI o LHV por sus siglas en inglés, lower heating value), y poder calorífico superior (PCS o HHV por sus siglas en inglés, higher heating value).

²² ASTM E872-82. Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustible de madera particulada. [en línea]. (aprobada en 2013). [consultada: 15 de octubre de 2018]. Disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82\(2013\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82(2013))

²³ ASTM E1755-01. Método de prueba estándar para cenizas en biomasa. [En línea]. (aprobada en 2015). [consultada: 15 de octubre de 2018]. Disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01(2015))

El poder calorífico superior: Es la energía total liberada cuando el combustible es quemado en presencia de aire, incluyendo el calor latente contenido en el vapor de agua y por lo tanto representa la máxima cantidad de energía potencialmente obtenible de un combustible.

El poder calorífico inferior: Es la energía total liberada cuando el combustible es quemado en presencia de aire, excluyendo el calor latente contenido en el vapor de agua. En términos prácticos, el calor latente contenido en el vapor de agua no puede ser usado efectivamente.

Las pruebas de poder calorífico se realizaron en una bomba calorimétrica Parr modelo 6200 controlada por un microprocesador, ubicada en el parque tecnológico Guatiguará. Se utilizaron los siguientes equipos y elementos:

- ✓ Bomba calorimétrica parr 6200.
- ✓ Sistema de llenado de oxígeno.
- ✓ Sistema de control de la operación de análisis.
- ✓ Sistema de calentamiento del agua.
- ✓ Prensa de pastilla CAVER modelo # 3912.
- ✓ Impresora.
- ✓ Balanza analítica SHIMADZU modelo ATY224 con una precisión de 0,1 mg.
- ✓ Hilo de ignición.
- ✓ Caja Petri.

Estas pruebas determinaron cuál fue la mejor muestra de las mezclas torrefactadas en cuanto a la liberación de energía el análisis termogravimétrico.

- **Tamizado:** Las muestras son tamizadas para así poder trabajar con una misma condición de tamaño de grano. Se usará una malla número 70 estandarizada en la norma ASTM E-11. Importante para definir qué temperatura y tiempo de torrefacción son los mejores para los análisis fisicoquímicos y la TGA.
- **Análisis elemental:** Determinará la composición de la biomasa en porcentaje de Carbón, hidrogeno y oxígeno principalmente.
- **Análisis termogravimétrico:** Se llevó a cabo para estudiar las reacciones de descomposición térmica, determinar la energía de activación y el factor pre-exponencial. Se llevó a cabo en 3 atmósferas y con 3 velocidades de calentamiento, 5 °C/min, 10 °C/min, y 15 °C/min y a diferentes condiciones de la muestra.
- **Modelo cinético**²⁴ Es una expresión matemática la cual nos permite predecir el comportamiento y concentración en una reacción química con respecto al tiempo. La cual es útil si se desea construir reactores a diferentes capacidades de producción.

Para obtener la ecuación cinética se requiere especificar un mecanismo de reacción que incluya las reacciones elementales que componen el proceso. El estudio de la descomposición térmica de la biomasa es complejo, pues

²⁴ RINCON, Sonia; GOMEZ y Alexander; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial [en línea] . Bogotá: universidad nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica.2011. p.27. [consultado 30 de marzo de 2019]. Disponible en https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=a2Th1GjH0gEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=26.%09RINCON,+Sonia%3B+GOMEZ,+Alexander%3B+KLOSE,+Wolfgang.+&ots=25_CvpwYM4&sig=e0Gvc98acFRJlv-Z1Dbc9e-GiB8&redir_esc=y#v=onepage&q=26.%09RINCON%2C%20Sonia%3B%20GOMEZ%2C%20Alexander%3B%20KLOSE%2C%20Wolfgang.&f=false

existen muchos productos y reacciones intermedias que no son posibles de cuantificar pero basándose en el modelo cinético de Arrhenius, este problema se simplifica teniendo en cuenta la reacción o grupo de reacciones que limitan la velocidad global de la reacción.

- **Métodos para la determinación de los parámetros cinéticos:** Actualmente existen muchos estudios cinéticos sobre descomposición térmica de biomasa, utilizando el análisis termogravimétrico (TG), no obstante, hay métodos que se adaptan mejor según las condiciones de descomposición del TG de la biomasa. El modelado cinético puede ser realizado por métodos isoconversionales, por métodos de reacciones paralelas independientes o por el método de reacciones consecutivas.

RUEDA ORDOÑEZ, YESID²⁵ hizo un estudio cinético isoconversional a la descomposición térmica de la paja de caña de azúcar, implementando el método isoconversional de Friedman, obteniendo un valor de 149.71 [KJ/mol] para la energía de activación. Este modelo de reacción global infiere en errores debido a que los datos modelados son sobrestimados.

- **Análisis termogravimétrico²⁶:** La biomasa lignocelulosa, es una mezcla compleja de polímeros de carbohidratos conocidos como celulosa, hemicelulosa, lignina y pequeñas cantidades de otras sustancias como extractivos y cenizas, los cuales están contenidos en la pared celular de las plantas. El análisis termogravimétrico (TGA), es una técnica comúnmente

²⁵ RUEDA, Yesid; TANNOUS, Katia. Isoconversional kinetic study of the thermal decomposition of sugarcane straw for thermal conversion processes [en línea]. En: Bioresource Technology. Campinas: Universidad de Campinas, noviembre 2015, vol.196, p.136-144. [Consultado: 3 de febrero de 2019]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241501024X>

²⁶ CUTIÑO, Enma; MEDINA, Margarita; ORTEGA, Giselle. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales [en línea]. En: RTQ. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, mayo-agosto de 2011, vol.31, nro.2; p.3. [Consultado: 20 mayo de 2019]. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000200005

utilizada para estudiar las reacciones de descomposición térmica de este tipo de materiales, determinando las características de la liberación de volátiles y los parámetros cinéticos, tales como, la energía de activación y el factor pre-exponencial. También, es posible determinar la influencia de la temperatura y la velocidad de calentamiento en el desarrollo de las reacciones de descomposición térmica y los mecanismos de reacción.

En los procesos de termo-conversión, la información relativa a la distribución de los productos y el desarrollo cinético se obtiene, en general, por dos vías clásicas:

- ✓ A partir de la curva de pérdida de masa, o curva termogravimétrica.
- ✓ A partir de la dinámica de formación de los productos en reactores de pirolisis a pequeña escala.

El análisis térmico, ha sido definido como un grupo de técnicas en la cual una propiedad de una muestra es monitoreada con relación al tiempo o temperatura, en una atmósfera específica, a un régimen programado de temperatura. En el análisis termogravimétrico, se registra la pérdida de peso de una muestra en la medida en que se incrementa la temperatura, hasta temperaturas de 1200°C, bajo condiciones controladas de velocidad de calentamiento y diferentes atmósferas de reacción. Obteniéndose por esta vía las curvas denominadas TG o curvas de termogravimetría y las curvas de análisis termogravimétrico diferencial (DTG, por sus siglas en idioma inglés).

- **Validación de los resultados:** Los resultados serán validados por medio del método de porcentaje de desviación estándar AVP, lo recomendable es que sea de un valor menor al 5%.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en la investigación de la caracterización de residuos alimenticios, presentando los parámetros cinéticos obtenidos de los tratamientos realizados (torrefacción) y los modelamientos matemáticos de la termogravimetría.

4.1 ANÁLISIS DE HUMEDAD

Inicialmente se pesaron y prepararon las muestras para ser colocadas en el horno-mufla para la prueba de secado a 16 horas; seguidamente se prepararon muestras para un secado de 13 horas y posteriormente de 2 horas, en la siguiente imagen se puede evidenciar la manera en que fueron puestas las caja Petri dentro del horno-mufla con la biomasa para el proceso de secado. En la figura (2) se muestra como ingresaron inicialmente las muestras al horno mufla.

Figura 2. Alimentos puestos en la mufla antes del secado.



Una vez pasadas las 16 horas, las muestras fueron retiradas del horno-mufla y llevadas a un desecador para terminar su proceso de secado, posteriormente se

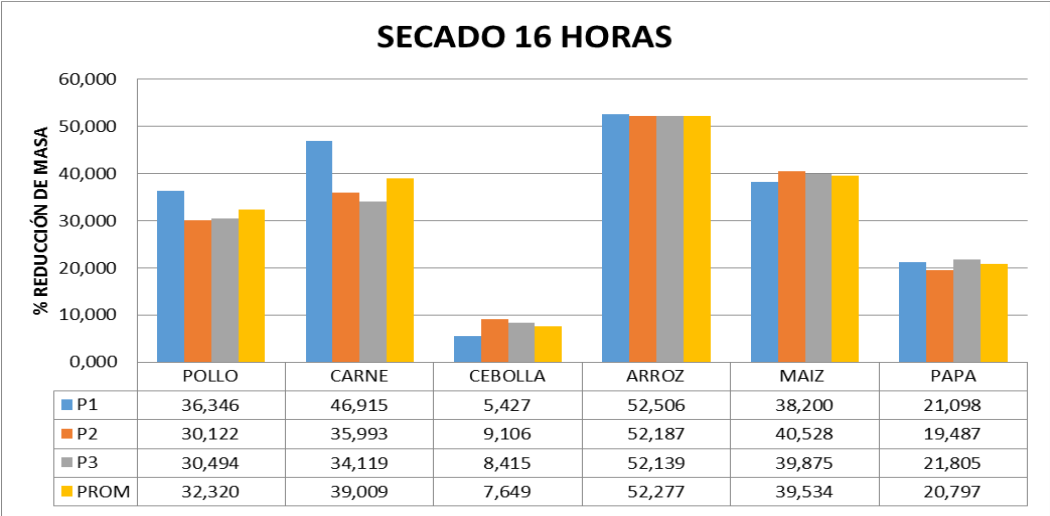
tomaron los pesos respectivos una vez finalizada la prueba. En la figura (3) se evidencia el resultado final de la prueba de humedad.

Figura 3. Alimentos después del secado de 16 horas.



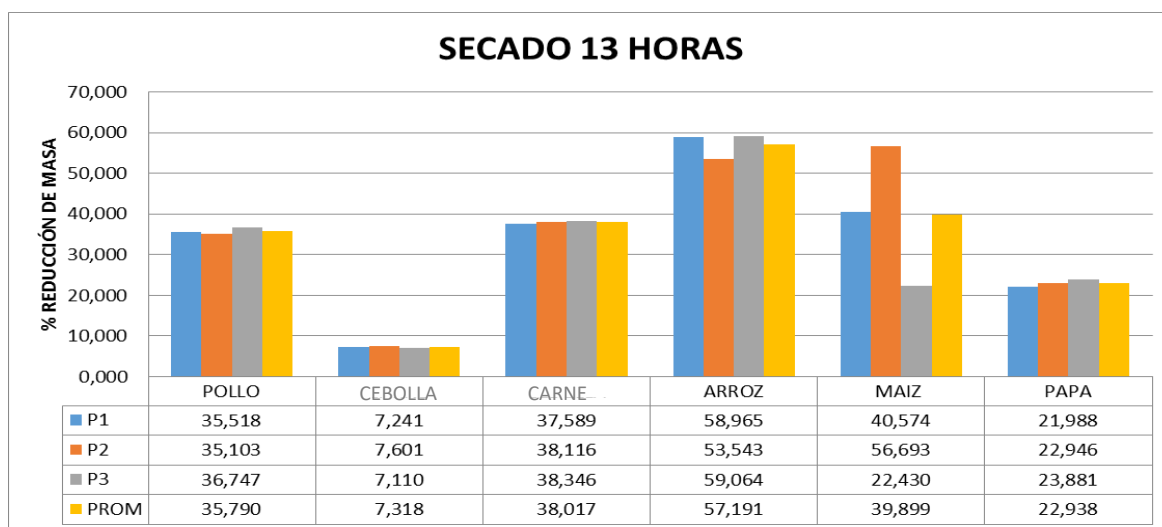
En la figura (4) están los datos obtenidos para 3 pruebas diferentes con un tiempo de secado de 16 horas. Se puede observar la variación que sufre cada alimento en las diferentes pruebas, notando una reducción de masa muy constante en algunos como lo son el arroz, el maíz y la papa; y en los alimentos cárnicos la variación es un poco menos constante, en el caso de la cebolla se tiene una variación muy poco significativa en cuanto a la reducción de masa, siendo esta la de menos variación en comparación con los demás alimentos.

Figura 4.Reducción de masa por secado de 16 horas.



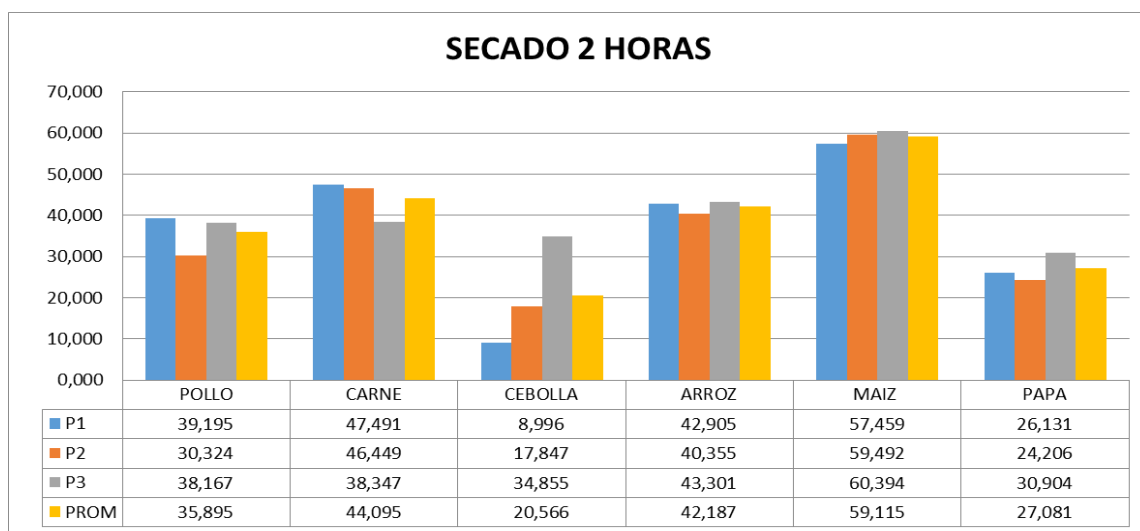
En la figura (5) se observa cómo al disminuir el tiempo de secado la variación de masa de cada alimento varía con respecto al tiempo anterior (16 horas), en este caso tenemos a la cebolla, papa, carne e incluso el pollo en una rango de variación constante, siendo ahora el arroz y el maíz quienes más variantes sufren en su proporción de masa. También se puede observar que el comportamiento de la cebolla se hace más constante y aumenta un poco con respecto al de 16 horas, pero que aún se mantiene como el alimento que menos reducción de masa sufre respecto a los demás.

Figura 5. Porcentaje de reducción de masa por secado a 13 horas.



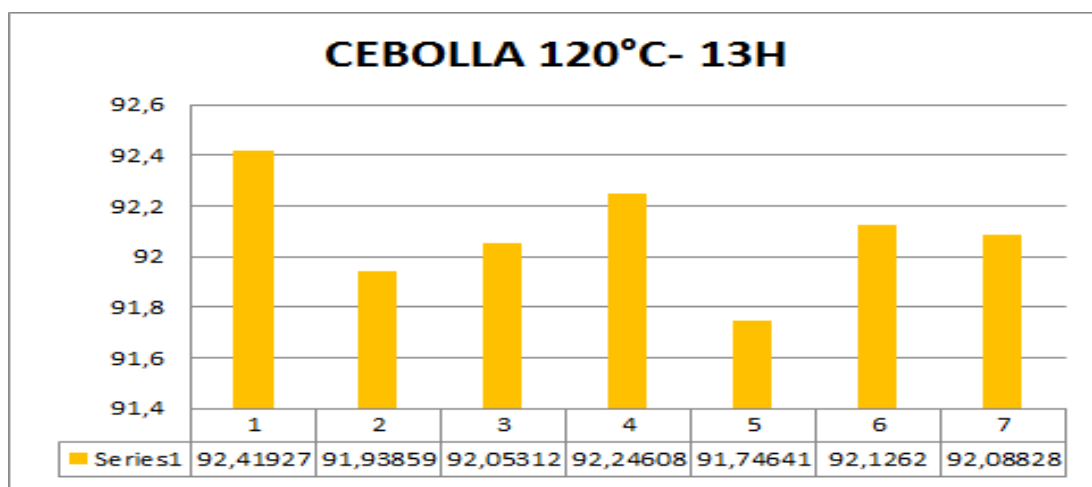
En la figura (6) se puede apreciar una variación menos constante en cada alimento respecto a las gráficas (4) y (5), siendo el maíz quien mayor reducción de masa sufre y el que se mantiene más constante, seguidamente el arroz en constancia y la carne en pérdida de masa. La cebolla varía notablemente en cada prueba variando significativamente su reducción de masa con un secado de 2 horas.

Figura 6. Porcentaje de reducción de masa por secado a 2 horas.



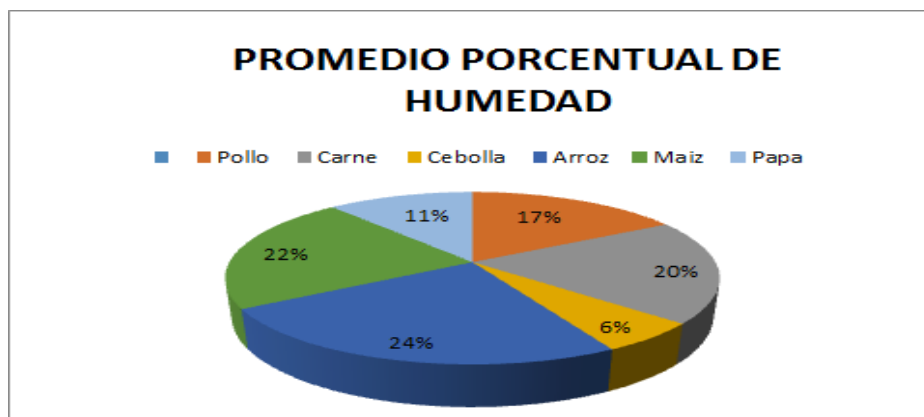
Con la cebolla se evidenció un comportamiento de reducción de masa muy bajo respecto a los demás alimentos, por lo cual se realizaron pruebas de secado a 120 °C por 13 horas para ver la variación de masa a una temperatura mayor de los 105°C que se practicaron en las pruebas anteriores, los resultados son expuestos en la siguiente gráfica.

Figura 7. Análisis de la cebolla en un secado de 13 horas a 120 °C.



4.1.1 Resultados de humedad total de la muestra. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas de secado, se puede determinar con un promedio final (promedio de los promedios de cada prueba), la cantidad porcentual de masa seca de cada alimento que fue secado individualmente.

Figura 8. Representación porcentual del promedio de la reducción de masa de cada alimento.



Para la determinación del porcentaje de humedad total se debe especificar que las pruebas de humedad se realizaron por separado para cada alimento, con cantidades de masa diferentes a las de nuestros parámetros de masa original así que decidió ponderar la humedad de cada alimento, para obtener un aproximado de lo que sería en nuestra muestra real. Así que si se requiere modificar la proporción de muestra real se puede obtener el porcentaje de humedad en cualquiera que sea el caso.

Teniendo como resultado un porcentaje aproximado de masa de humedad total del 0,38%. El procedimiento se muestra a continuación en la tabla (3).

Tabla 3. Humedad en la proporción de masa utilizada.

ELEMENTO	CANTIDAD % MUESTRA REAL	% DE HUMEDAD 13 H PROMEDIO DE 3 PRUEBAS	PORCENTAJE DE HUMEDAD CON LOS PARAMETROS DE BIOMASA (PORCENTAJE DE HUMEDAD * CANTIDAD % MUESTRA REAL)
Maíz	47.4	39.899	18.912
Arroz	16.2	57.190	9.264
Pollo	13.1	35.789	4.688
Carne	7.3	38.017	2.775
Cebolla	8	7.317	0.585
Papa	8	22.938	1.835
Total	100		38.061

4.2 TORREFACCIÓN

Anteriormente como se señaló en la matriz de la tabla (2) se realizaron 3 pruebas con 4 temperaturas y dos tiempos diferentes, para un total de 24 datos. El procedimiento que se llevó a cabo en el proceso fue el siguiente:

Se pesó cada alimento según lo descrito en la tabla (1), creando una mezcla de todos los alimentos y se introdujeron en el horno-mufla como muestra la figura (9).

Figura 9. Muestras antes del proceso de secado y posterior torrefacción.



Los tiempos utilizados fueron de 30 min y 15 min a temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C y 275 °C, obteniendo así muestras procesadas por torrefacción similares a las de la figura (10) que nos muestra la prueba de torrefacción a una temperatura de 275°C por 30 minutos.

Figura 10. Muestras después de una torrefacción a 275 °C por 30 min.



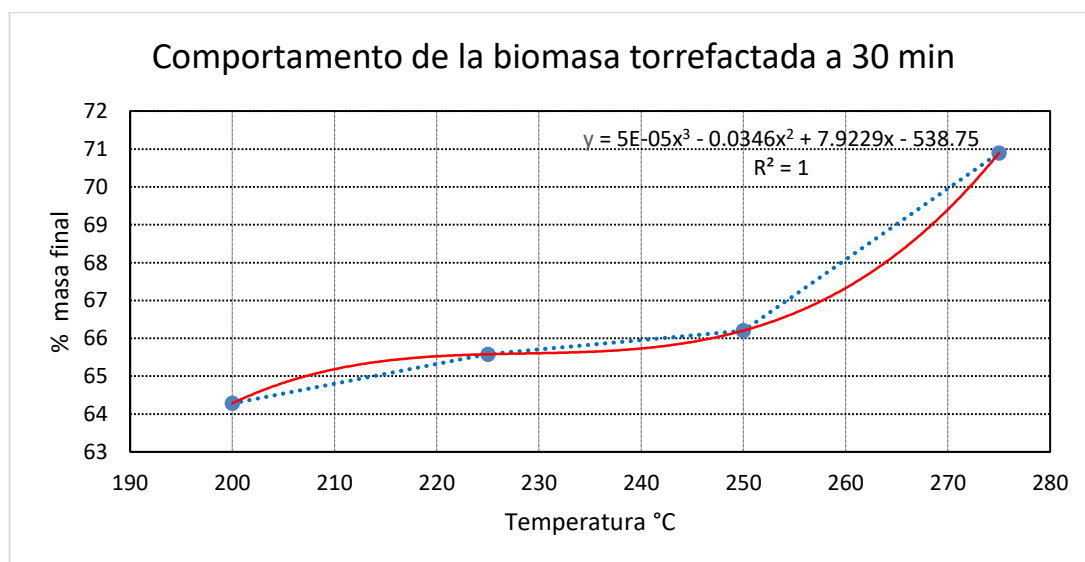
La masa inicial implementada para la prueba de torrefacción en un tiempo de 30 minutos, para las temperaturas de 200°C, 225°C y 250°C fue de $10 \pm 0,037\text{gr}$, sin embargo para la temperatura de 275°C se tomó una masa inicial de $9 \pm 0,5\text{gr}$, debido a que al momento de realizar esa prueba no hubo más biomasa disponible, los resultados obtenidos se expresan en la tabla (4).

En la figura (11) se observa el comportamiento de la biomasa con un tratamiento de torrefacción a 30 minutos y a temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C y 275°C, se observa que a medida que aumenta la temperatura la reducción de masa es menor, es decir, que la reducción más baja se obtuvo a una temperatura de 275 °C. El comportamiento se puede predecir para temperaturas diferentes (dentro del rango estudiado), por medio de la regresión de los datos obtenidos con la ecuación: $Y = 5E - 05x^3 - 0.0346x^2 + 7.9229x - 538.75$.

Tabla 4. Resultados de las pruebas de torrefacción en un tiempo de 30 minutos.

30 MINUTOS			
TEMPERATURA °C	Nº	MASA INICIAL (gr)	MASA SIN HUMEDAD (gr)
200	1	9,959	6,469
	2	9,97	6,305
	3	9,939	6,425
225	1	9,981	6,479
	2	10	6,560
	3	10	6,669
250	1	9,972	6,614
	2	10	6,599
	3	10	6,632
275	1	9,793	6,724
	2	8,979	6,469
	3	8,972	6,456

Figura 11. Comportamiento de la biomasa torrefactada a 30 minutos.



Para las pruebas de torrefacción en un tiempo de 15 minutos, la masa inicial implementada para las temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C y 275°C fue de $10 \pm 0,03\text{gr}$, los resultados obtenidos se expresan en la tabla (5).

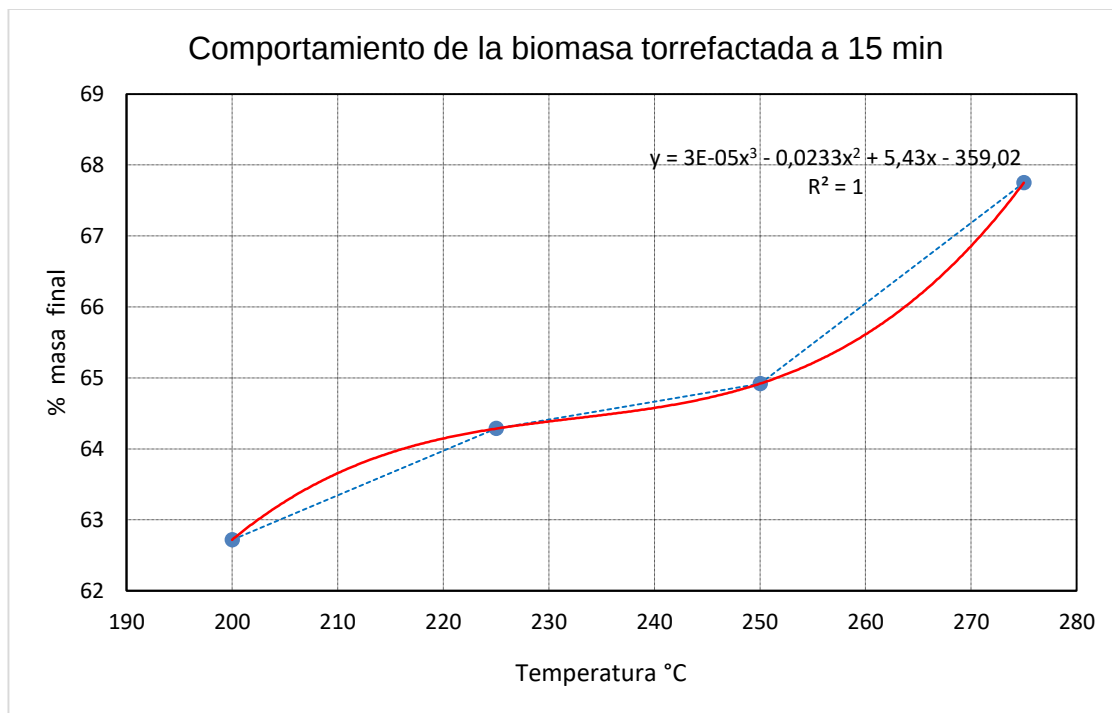
Tabla 5. Resultados de las pruebas de torrefacción en un tiempo de 15 minutos.

15 MINUTOS			
TEMPERATURA °C	N°	MASA INICIAL (gr)	MASA SIN HUMEDAD (gr)
200	1	9,99	6,29
	2	10,05	6,34
	3	10,025	6,23
225	1	10,056	6,339
	2	9,937	6,509
	3	10,02	6,445
250	1	10,057	6,601
	2	9,972	6,412
	3	9,996	6,479
275	1	10,018	6,761
	2	10,012	6,823
	3	10,008	6,767

En la figura (12) se puede observar el comportamiento de la biomasa con un tratamiento de torrefacción a 15 minutos y a temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C y 275°C, se aprecia que de igual manera a medida que aumenta la temperatura la reducción de masa es menor, es decir, la reducción más baja se obtuvo a una temperatura de 275 °C, logrando predecir su comportamiento para

otras temperaturas por medio de la regresión de los datos obtenidos con la ecuación: $Y = 3E-05x^3 - 0,0233x^2 + 5,43x - 359,02$.

Figura 12. Comportamiento de la biomasa torrefactada a 15 minutos.

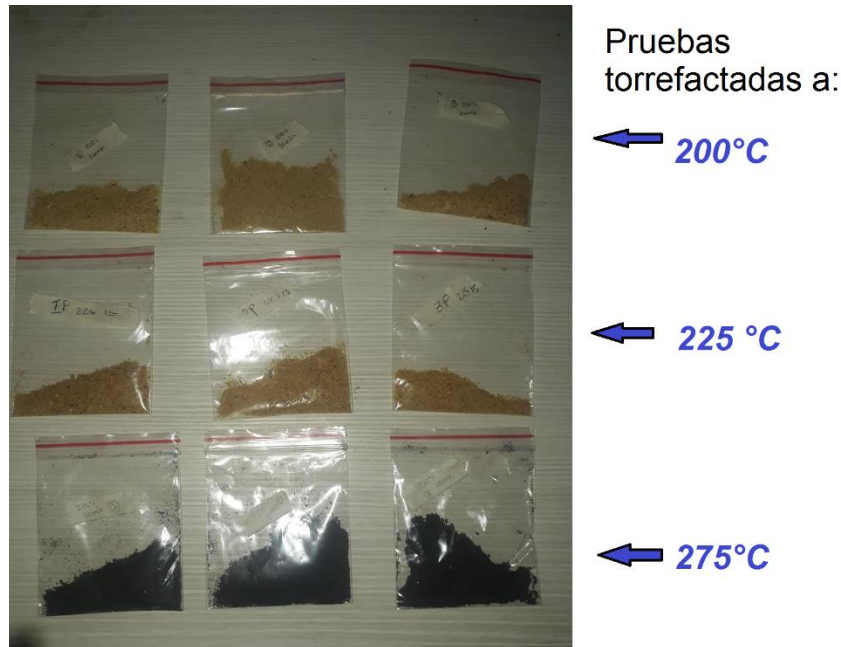


4.3 TRITURADO

Las muestras torrefactadas fueron trituradas para así poder llevar a cabo los demás procedimientos experimentales, los resultados de prueba de volátiles, calorimetría y termogravimetría.

En la figura (13), (30 min de torrefacción) se pueden apreciar muestras trituradas notando la diferencia de tono de color que tienen las muestras torrefactadas dependiendo la temperatura a la cual fueron tratadas las muestras.

Figura 13. Muestras después de la trituración.



4.4 PRUEBA DE VOLÁTILES

Los constituyentes gaseosos que son liberados en la prueba de volátiles son principalmente agua, hidrogeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, entre otros.

Se realizó para una muestra de aproximadamente 1 gramo, a la que seguidamente se le practicó la prueba de cenizas para poder obtener así también el resultado de carbono fijo.

Esta prueba se llevó a cabo con las proporciones dadas anteriormente en la tabla (1) y las muestras utilizadas fueron las muestras secas a 13 horas-prueba 1, siguiendo la norma ASTM E872-82²⁷.

²⁷ ASTM E872-82. Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustible de madera particulada. [en línea]. (aprobada en 2013). [consultada: 15 de octubre de 2018]. Disponible en internet [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82\(2013\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82(2013))

En la tabla (6) se puede apreciar un promedio final de 83,172% de material volátil liberado, siendo un valor favorable según lo indicado en otras literaturas donde se recomienda estar dentro de un rango mayor al 75% y menor al 90%.

Tabla 6. Resultados de la prueba de volátiles.

MASA (gr)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Inicial	0,733	0,998	0,997
Final	0,608	0,824	0,837
% Volátiles	82,978	82,6004	83,936
% Promedio	83,172± 0,005		

4.5 PRUEBA DE CENIZAS

La ceniza es el material que queda cuando se realiza una combustión completa de la biomasa, compuesta principalmente por sustancias inorgánicas no combustibles, tales como minerales. Para el estudio se tomó como guía el método de prueba estándar para cenizas en biomasa (Norma ASTM E1755-01²⁸). La cual define la ceniza como el residuo inorgánico que queda después de la ignición a 575±25°C, siendo una medida aproximada del contenido de minerales y materia inorgánica en la biomasa.

²⁸ ASTM E1755-01. Método de prueba estándar para cenizas en biomasa. [En línea]. (aprobada en 2015). [consultada: 15 de octubre de 2018]. Disponible en internet [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01(2015))

El cálculo de ceniza se realizó en base seca y se utilizó la ecuación **3** para el cálculo de esta, donde ash , m_{ash} , m_{cont} y m_{od} son el porcentaje de ceniza, la masa de ceniza más el crisol, la masa del crisol, y la masa inicial de la muestra más el crisol, respectivamente.

$$ash = \left[\frac{m_{ash} - m_{cont}}{m_{od} - m_{cont}} \right] * 100 \quad (3)$$

Para estas pruebas se tomaron las pruebas de volátiles (figura (14)) analizadas anteriormente y cuyos resultados fueron:

Figura 14. Resultado final de la pruebas de cenizas en el crisol.



En la tabla (7), se muestra los datos de la masa inicial de cada muestra en base seca, la masa que quedo después de la prueba de volátiles, y la masa final obtenida en la prueba de cenizas, teniendo un promedio final de cenizas de un 2.472% en base seca.

Tabla 7. Resultado prueba de cenizas.

Masa(gr)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Muestra inicial	0,733	0,998	0,997
Después de volátiles	0,1248	0,1737	0,1602
Muestra final	0,0197	0,0241	0,0231
% Cenizas	2,686	2,416	2,316
%Promedio	2.472±0.061		

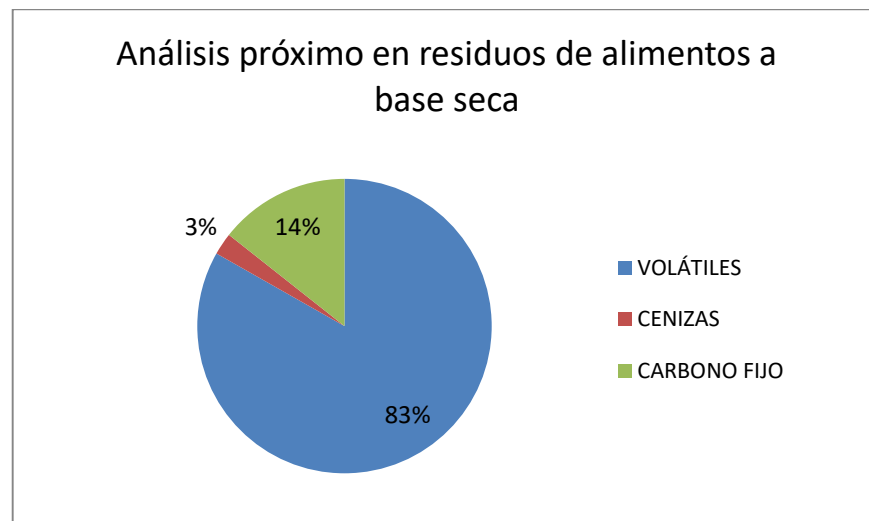
4.6 CARBONO FIJO

La parte no volátil y quemada del sólido es el carbón fijo presente en la muestra. Este dato se obtuvo con la ecuación (2) y con los resultados de las pruebas de volátiles y cenizas expuestos anteriormente.

$$\%C_F = 100 - \%83,172 - \%2,472 = 14,356\% \quad (2)$$

En la figura (15) se representan los resultados del análisis próximo en la muestra estudiada de residuos de alimentos a base seca, se puede apreciar como la mayor parte de la muestra 83,1719% reacciona con acción volátil, el 2,472% pertenece a cenizas y el 14,356% nos genera carbono fijo en la mezcla.

Figura 15. Representación gráfica de contenido de cenizas, volátiles y carbono fijo de la muestra analizada.



4.7 PODER CALORÍFICO

El valor del poder calorífico de una biomasa es fundamental para realizar la valorización energética de esta y el rendimiento que proporcionaría. El poder calorífico es el calor liberado cuando un combustible se quema por completo en un proceso de flujo estacionario.

El número de pruebas realizadas a las muestras torrefactadas fueron 24; 3 pruebas por cada temperatura a 15 minutos y 30 minutos.

Por medio del poder calorífico se seleccionó y determinó cuál fue la muestra en el que mayor aporte hizo con el proceso de torrefacción. Inicialmente se prepararon las muestras en forma de pastilla para así ser quemadas en la bomba calorimétrica Parr 6200 (figura(16)).

Figura 16. Calorímetro Parr 6200.



A continuación, en la figura (17) se muestra la secuencia llevada a cabo.

- ✓ Se pesó aproximadamente 1 gr de muestra triturada para la realización de la pastilla, como se presenta en la figura (17a). Seguidamente se ubicó la cantidad de muestra pesada en la camisa para moldear en la prensa, (figura (17b)) y una vez prensada se retiró y se pesó la pastilla junto con la cantidad adecuada de ácido benzoico, como se ve en la figura (17c). Después se acomodó la mecha de forma que hiciera contacto con la pastilla y el ácido benzoico en la tapa de la bomba, (figura (17d)); seguidamente se selló la bomba para inyectarle el oxígeno e ingresarla al calorímetro (figura (17e)), finalmente se introdujo la bomba dentro del calorímetro y se dio inicio a la prueba, representado en la figura (17f).

Figura 17. Secuencia del proceso para la toma del poder calorífico de la biomasa.



En las tablas (8) y (9) se pueden apreciar los datos con los que realizo la medición del poder calorífico de las muestras tratadas a diferentes condiciones, se tabulo el tamaño de la pastilla, la cantidad de ácido benzoico utilizado, el incremento y el poder calorífico obtenido, así como el promedio del poder calorífico según la temperatura utilizada en cada intervalo de tiempo de torrefacción.

Tabla 8. Pruebas de calorimetría a las pruebas torrefactadas de 30 minutos.

TEMPERATURA		30 MINUTOS				
		PODER CALORIFICO MJ/KG	INCREMENTO	ACIDO BENZOICO	PASTILLA	PROMEDIO PODER CALORIFICO
200	1	18,5603	2,3483	0,19	0,9969	19,26
	2	19,9493	2,3463	0,21	0,8991	
	3	19,2866	2,4744	0,2049	1,0046	
225	1	17,4848	2,1450	0,1979	0,9293	19,125
	2	20,1292	1,9429	0,1841	0,7243	
	3	19,7626	2,4292	0,1743	0,9985	
250	1	19,5478	2,4713	0,1980	0,9991	19,6
	2	19,4974	2,4823	0,1945	1,0121	
275	1	21,7160	2,7483	0,2009	1,0143	22,055
	2	22,7015	2,8449	0,2144	1,0068	
	3	21,7474	2,7430	0,2099	1,0093	

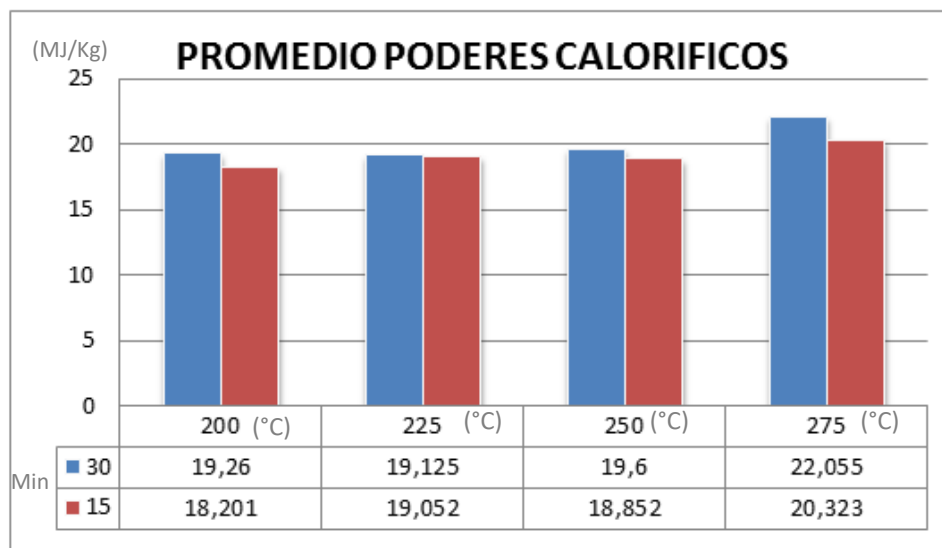
Tabla 9. Pruebas de calorimetría a las pruebas torrefactadas de 15 minutos.

TEMPERATUR A		15 MINUTOS				
		PODER CALORIFICO MJ/KG	INCREMENTO	ACIDO BENZOICO	PASTILLA	PROMEDIO PODER CALORIFICO
200	1	18,2887	2,381	0,202	1,0124	18,201
	2	18,1484	2,475	0,1918	1,0861	
	3	18,1666	2,5278	0,2044	1,097	
225	1	19,2559	2,5789	0,2215	1,0382	19,052
	2	19,1671	2,3850	0,1924	0,9818	
	3	18,7332	2,3814	0,2061	0,9828	
250	1	19,3242	2,6099	0,2010	1,0787	18,852
	2	19,3676	2,5700	0,1906	1,0684	
	3	17,8650	2,5825	0,2357	1,1	
275	1	20,1785	2,5572	0,1980	1,0107	20,323
	2	20,6305	2,5318	0,1940	0,9813	
	3	20,1613	2,6345	0,1915	1,0537	

En la figura (18) se van comparando los resultados de los promedios de las de poderes caloríficos de las pruebas torrefactadas a 15 minutos y 30 minutos podemos observar que sin importar la temperatura, las pruebas sometidas a 30 minutos de torrefacción, siempre van a obtener mayores valores de poder calorífico.

Se pudo notar que no hubo una gran diferencia entre los promedios del poder calorífico obtenido en cada temperatura para los dos tiempos (30 min y 15 min), sin embargo, el mayor promedio se obtuvo en las muestras que fueron tratadas a 275°C para las dos pruebas de torrefacción, siendo de 22,055 MJ/KG para la de 30 minutos y de 20,323 para la de 15 minutos, el poder calorífico si aumenta con la temperatura en la prueba de 30 minutos.

Figura 18. Promedio de poderes caloríficos.

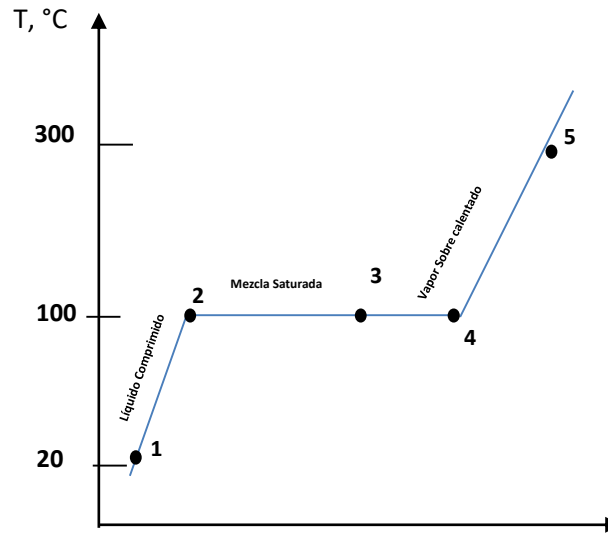


4.8 TEMPERATURA ÓPTIMA DE TRABAJO PARA LA TORREFACCIÓN

De acuerdo a los valores obtenidos en las pruebas de poder calorífico se seleccionó la muestra trabajada a 275°C por 15 minutos para la realización de análisis de descomposición a través de termogravimetría. Las muestras tuvieron dos etapas de tratamiento, una de secado y una de torrefacción. El análisis termodinámico se hizo para evaluar la energía consumida y no para seleccionar.

4.8.1 Modelo termodinámico del calor requerido en el proceso. Para nuestro análisis es considerado el calor latente contenido en la humedad de cada alimento. (ANEXO (A)).

Figura 19. Esquema termodinámico del agua



Se planteó la siguiente ecuación:

$$Q_c = m_w * C_{p_w} * (T_{Sat@92KPa} - T_0) + m_{BS} * C_{p_B} * (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Siendo, Q_c la energía necesaria para calentar y secar la biomasa; m_w la masa húmeda de la biomasa ; $C_{p_w} = 4,18 \frac{KJ}{KgK}$ el calor específico del agua; $T_{Sat@92KPa} = 97,29^\circ C$ temperatura de saturación del agua a 92 KPa (presión atmosférica Bucaramanga); $T_0 = 30^\circ C$ la temperatura inicial del proceso; T_1 la temperatura inicial de la biomasa que fue variando de $30^\circ C$ a $105^\circ C$ a medida que transcurría el tiempo para alcanzar la temperatura de secado de la biomasa ; m_{BS} la masa de la biomasa seca; $C_{p_B} = 1,38 \frac{KJ}{KgK}$ el calor específico de la biomasa tomando en este caso el de la madera y $T_2 = 105^\circ C$ la temperatura final del proceso de secado dada por la norma ASTM E-1756 .

Adicionalmente para la solución de la ecuación 18 tendremos los siguientes balances de masa:

$$m_w = m_B * \%Humedad \quad (5)$$

$$m_{BS} = m_B - m_B * \%Humedad \quad (6)$$

$$m_{BS} = m_B * [1 - \%Humedad] \quad (7)$$

Siendo m_B masa de la biomasa total y $\%Humedad = 0,38$ (numeral 5.1.1).

Reemplazando lo anterior en la ecuación (4) tenemos:

$$Q_c = m_B * \%Humedad * Cp_w * (T_{Sat@92KPa} - T_0) + (1 - \%Humedad) * m_B * Cp_B * (T_2 - T_1) \quad (8)$$

$$\frac{Q_c}{m_B} = \%Humedad * Cp_w * (T_{Sat@92KPa} - T_1) + (1 - \%Humedad) * Cp_B * (T_2 - T_1) \quad (9)$$

Seguidamente para la obtención de la energía de evaporización,

$$Q_{evap} = m_w * h_{fg@92KPa} \quad (10)$$

Sustituyendo tenemos que:

$$\frac{Q_{evap}}{m_B} = \%Humedad * h_{fg@92KPa} \quad (11)$$

Con un valor de $h_{fg@92KPa} = 2257,5 \frac{KJ}{KgK}$.

También se obtuvo la energía utilizada para el proceso de torrefacción:

$$Q_{Torref} = m_B * Cp_{B'} * (T_{Torref} - T_{2'}) + Q_{Reacc} * m_B \quad (12)$$

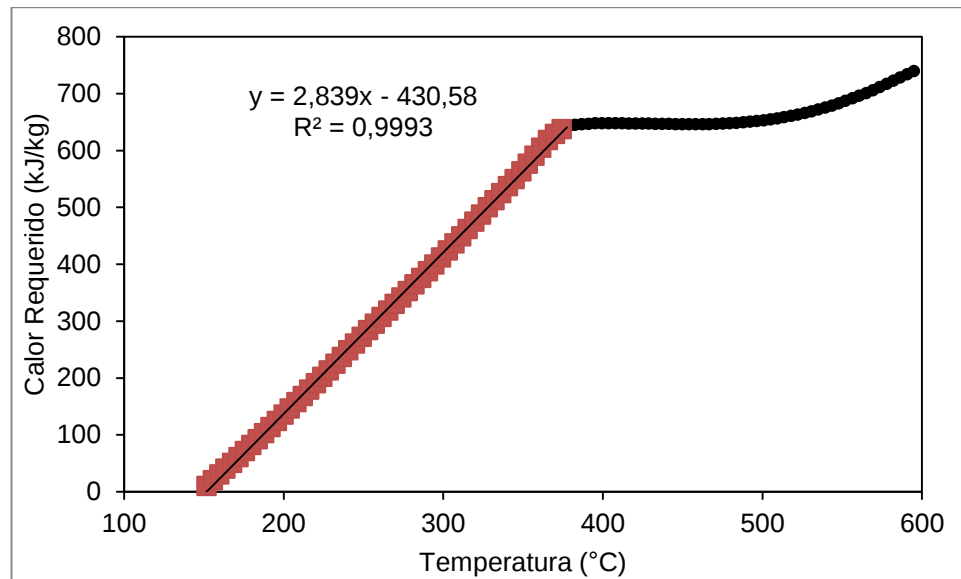
$$\frac{Q_{Torref}}{m_B} = C_{p_{B'}} * (T_{Torref} - T_{2'}) + Q_{Reacc} \quad (13)$$

Donde, Q_{Torref} es la energía necesaria para el proceso de torrefacción; m_B la masa de biomasa; $C_{p_{B'}} = 1,4490 \frac{KJ}{KgK}$ calor específico de la biomasa, donde se tomó el valor promedio del calor específico de la madera más el valor del calor específico del carbón vegetal; $T_{2'}$ la temperatura final al proceso de torrefacción, T_{Torref} la temperatura de torrefacción y Q_{Reacc} la energía necesaria para que se lleve a cabo la reacción final del proceso; siendo Q_{Torref} , T_{Torref} y Q_{Reacc} variables con el paso del tiempo.

Para el calor de reacción se realizó la figura (20) (datos cedidos por el autor), que representa el calor experimental requerido obtenido en la descomposición de caña de azúcar en atmosfera de nitrógeno, con estos datos se parametrizó la zona recta, que va hasta una temperatura de 382.6 °C, por medio de una regresión lineal dejando el calor de reacción en función de la temperatura de torrefacción teniendo así la siguiente expresión para un rango de temperaturas entre 150°C y 350°C:

$$Q_{reacc} = 2,839 * T_{torref} - 430,58 \quad (14)$$

Figura 20. Mediciones experimentales de calor obtenidas con DSC de la descomposición térmica de la caña de azúcar en atmosfera de nitrógeno.



Fuente: “Thermal decomposition analysis of sugarcane straw in inert and oxidative atmospheres through thermoanalytical methods” (RUEDA ORDOÑEZ, YESID; 2016)

En la tabla (10), se puede notar la energía necesaria para calentar y secar la biomasa (Q_c) disminuye al aumentar la temperatura, esto se debe a que el delta de diferencia entre el rango de las temperaturas va disminuyendo siendo el valor de T_2 mayor a la temperatura de torrefacción, haciendo que el término que corresponde al aporte de la biomasa vaya en descenso a medida que se acerca a una temperatura de 105°C, el más alto valor se obtiene a 30°C con un valor de $178,3 \left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ y el valor más bajo, en la temperatura de secado a 105°C, es de $114,2 \left(\frac{KJ}{Kg}\right)$.

La energía necesaria para el proceso torrefacción (Q_{Torref}) va aumentando notablemente con el aumento de la temperatura obteniendo el valor más alto a

275°C (temperatura más alta utilizada en el proceso de torrefacción) de $350,1 \left(\frac{KJ}{Kg}\right)$.

También se puede notar que la energía de reacción (Q_{Reacc}) va aumentando a medida que aumenta la temperatura teniendo un valor máximo de $350,1 \left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ (figura (21)).

Para completar el proceso de calentamiento, secado y torrefacción de la presente investigación, fue necesario un gasto de energía de $1314 \left(\frac{KJ}{Kg}\right)$.

Tabla 10. Resultados del análisis termodinámico de secado y torrefacción.

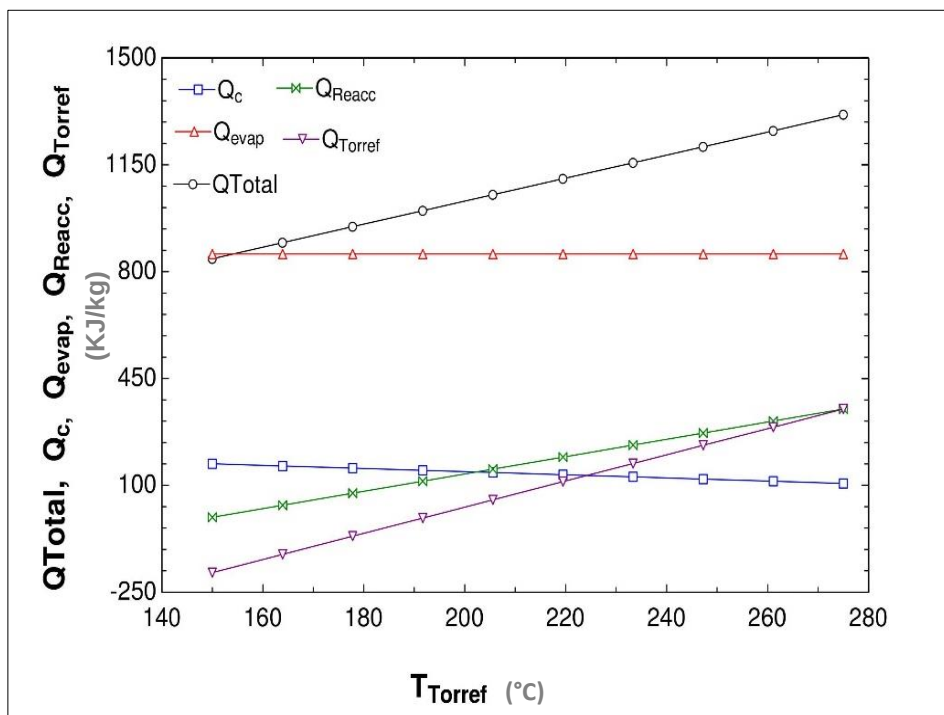
	T_1	T_{Torref}	Q_{Total}	Q_c	Q_{evap}	Q_{Reacc}	Q_{Torref}
Run 1	30	150	842,4	170,4	857,9	-4,73	-185,9
Run 2	38,33	163,9	894,8	163,3	857,9	34,7	-126,3
Run 3	46,67	177,8	947,2	156,1	857,9	74,13	-66,74
Run 4	55	191,7	999,7	149	857,9	113,6	-7,188
Run 5	63,33	205,6	1052	141,9	857,9	153	52,37
Run 6	71,67	219,4	1105	134,7	857,9	192,4	111,9
Run 7	80	233,3	1157	127,6	857,9	231,9	171,5
Run 8	88,33	247,2	1209	120,5	857,9	271,3	231
Run 9	96,67	261,1	1262	113,3	857,9	310,7	290,6
Run 10	105	275	1314	106,2	857,9	350,1	350,1

Teniendo en cuenta que el cálculo anterior de calor necesario se da en condiciones ideales, se supuso una condición extrema donde se tenga un 35% de pérdidas, así se necesitarán $1,773 MJ/Kg$ de energía para la torrefacción de los alimentos.

Elegimos la prueba de 275°C a 30 min de acuerdo a los valores obtenidos en las pruebas de poder calorífico y comparando los resultados de calor total necesario

con pérdidas, nos damos cuenta de que el valor de la torrefacción es realmente bueno, 10 veces mayor al necesario. (Figura (21)).

Figura 21. Representación de los valores del calor utilizado en el proceso.



4.9 TAMIZADO

Una vez obtenida la muestra con mayor aprovechamiento de energía se procedió a tamizar las muestras torrefactadas, (figura (22)) con las características anteriormente seleccionadas (30min-275°C) por una malla N° 70 (212 μm) para la realización de las pruebas de Termogravimetría y así poder controlar y manejar un solo tamaño de partícula, garantizando una mayor eficiencia al momento de realizar las pruebas.

Figura 22. Muestras torrefactadas (30min-275°C) tamizadas en malla 70 para las pruebas de TGA.



4.10 ANÁLISIS ELEMENTAL

El análisis elemental nos proporcionó los elementos que componen la biomasa, como el carbono, el hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

PARIKH, Jigsha et al.²⁹ Propusieron un método para la determinación de una correlación general, basada en el análisis próximo, con 200 puntos de datos de diferentes biomásas obtenidas en la literatura. También, establecieron que el contenido de carbono, hidrogeno y oxigeno son una función del porcentaje de peso en base seca de carbón fijo (C_f^*) y materia volátil (V_t^*).

$$C = 0.637C_f^* + 0.455 V_t^* \quad (15)$$

$$H = 0.052C_f^* + 0.062 V_t^* \quad (16)$$

$$O = 0.304C_f^* + 0.476 V_t^* \quad (17)$$

²⁹ PARIKH, Jigsha; CHANNIWALA, S.A; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials [en línea]. En: FUEL. Vol., 86, (2017). Pag 1710-1719. [consultado: 24 de octubre de 2018]. Disponible en internet https://www.researchgate.net/publication/244067708_A_correlation_for_calculating_elemental_composition_from_proximate_analysis_of_biomass_materials

Con las ecuaciones citadas anteriormente (15), (16) y (17) se obtuvo un valor teórico aproximado del contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno que está presente en la biomasa.

Donde los valores de carbono fijo fueron los hallados en el numeral (5.6) y los de material volátil en el numeral (5.4).

El análisis elemental también se obtuvo directamente de una prueba de laboratorio realizada en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, a muestras en base seca (13 horas de secado) en las proporciones anteriormente mencionadas en cantidad de masa de la tabla (1).

La muestra llevada para la prueba de análisis elemental fue tamizada en una malla N° 70 (212 μm), (figura (23)) para así mantener un tamaño de grano constante y que la prueba fuese más precisa.

Figura 23. Muestra en base seca tamizada para el análisis elemental.



Para las pruebas de análisis elemental se utilizó el analizador elemental SDCHN435 Carbon Hydrogen & Nitrogen Analyzer marca SUNDY, basados en la Norma ASTM D5373—16³⁰ (Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke).

Para la aplicación de la prueba se tomó una masa de 102,40 mg, con un porcentaje de humedad de 0%.

En la tabla (11) se aprecian los resultados obtenidos teórica y experimentalmente para la muestra en base seca, donde se evidenció que los resultados obtenidos experimentalmente siguen los lineamientos del método teórico propuesto por Parikh Jigisha et al.

Tabla 11. Resultados obtenidos teórica y experimentalmente.

	Análisis elemental			
Método	%C	%H	%O	%N
PARIKH, Jigisha et al	46.98	5,9	43.95	3.17
Experimental (base seca)	44,40	6,41	44,68	4,51

En la tabla (12) se evidencian los valores ya existentes en la literatura sobre el análisis elemental de los residuos de comida mezclados donde se ve una aproximación respecto a los valores obtenidos experimentalmente y teóricamente de la presente investigación, lo que señala que las pruebas están dentro del rango de los estudios ya realizados.

³⁰ ASTM D5373-16. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke. [en línea]. (última revisión 2016). [consultada: 18 de enero de 2019]. Disponible en internet https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D5373+16#fn00001

Tabla 12. Valores de análisis elemental de la literatura ya existente.

Datos típicos sobre el análisis elemental del material combustible presente en los residuos sólidos domésticos , comerciales e industriales						
	Porcentaje en peso (base seca)					
Tipos de residuos	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Comida y productos de comida						
Grasas	73	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
Residuos de comida (Mezclados)	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Residuos de carne	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9

Adicionalmente se realizó el análisis elemental a la muestra torrefactada seleccionada (275°C por 15 min) para el proceso de TGA, con una masa de 103,90 mg y un 0% de humedad, para observar que el proceso de torrefacción ejerce un cambio en la composición de la biomasa. A continuación, en la tabla (13), los resultados de laboratorio obtenidos:

Tabla 13. Resultados de análisis elemental muestra torrefactada.

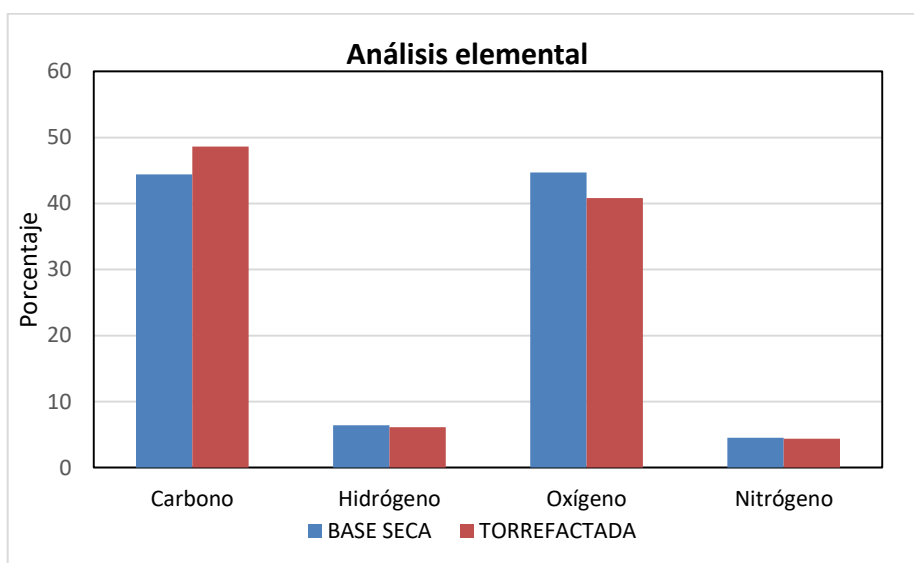
	Análisis elemental			
	%C	%H	%O	%N
Experimental (Muestra torrefactada)	48,63	6,12	40,88	4,37

En la figura (24) se puede apreciar que la cantidad de carbono en la muestra torrefactada aumenta un 4,23% respecto al de la muestra seca, que la cantidad

oxígeno de la muestra torrefactada disminuyó un 3.8% respecto a la muestra de base seca; De igual manera disminuyó el contenido de hidrogeno y nitrógeno un 0.29 % y 0,14% respectivamente.

Se evidenció que el proceso de torrefacción mejora las condiciones químicas de la biomasa, aumentando el contenido de carbono y disminuyendo el contenido de oxígeno.

Figura 24. Resultados análisis elemental muestra en base seca y torrefactada



Adicionalmente en la tabla (14) se ve una comparación de resultados ya existentes de residuos alimenticios y otras biomásas de procedencia agrícola.

Tabla 14. Comparación de resultados de análisis elemental.

Autor	Presente investigación	Jun-Ho Jo et al.	García R. et al.	Asadullah M et al.
Biomasa utilizada	Residuos orgánicos alimenticios	Residuos orgánicos alimenticios	Cáscara de almendra	Cuesco de palma
Carbono	44,40	47,5	46,35	45,1
Hidrogeno	6,41	12,2	5,67	5,1
Nitrógeno	4,51	2,9	0,30	0,56
Oxigeno	44,68	29,7	47,20	49,2
Azufre	--	--	0,22	0,04

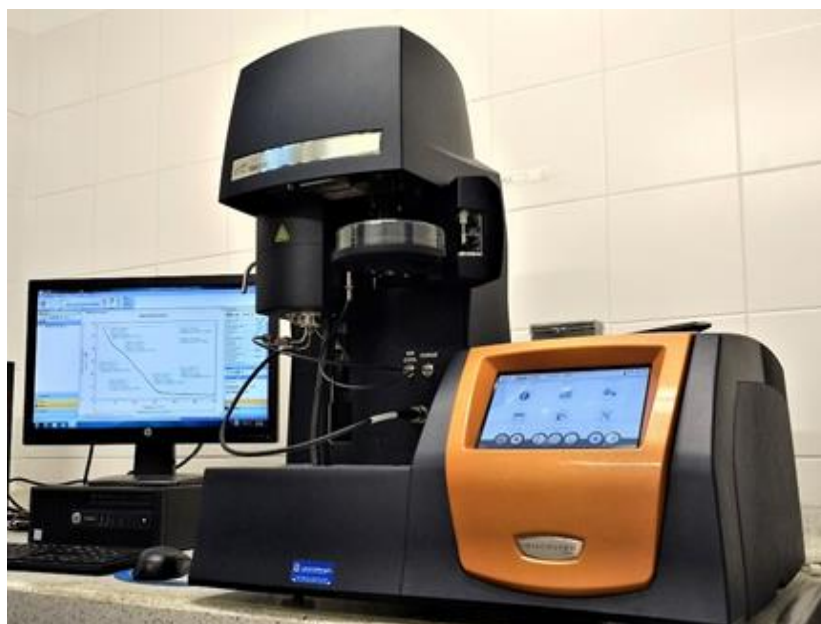
Nótese que los valores obtenidos en otras investigaciones no difieren significativamente en el resultado del porcentaje de carbono, manteniéndose por encima del 40%, aunque si es el más bajo en cuanto a las demás. Los resultados de hidrogeno de la cascara de almendra y el cuesco de palma son más cercanos al valor obtenido en la presente investigación, sin embargo, en comparación Jun-Ho Jo et al, se obtuvo aproximadamente el 50% respecto a su valor. En el caso del nitrógeno en la presente investigación se obtuvo un valor más elevado respecto a la demás; posiblemente esta variación de datos se da por las condiciones experimentales en las cuales se realizaron las pruebas.

4.11 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Para el estudio de la descomposición térmica de la biomasa (residuos de comida) se utilizó un analizador termogravimétrico TA Instruments, modelo TG 5500 (figura

(25)), ubicado en la escuela de ingeniería Química de la Universidad industrial de Santander, en el laboratorio de calorimetría y termogravimetría.

Figura 25. Analizador termogravimétrico TG 5500.



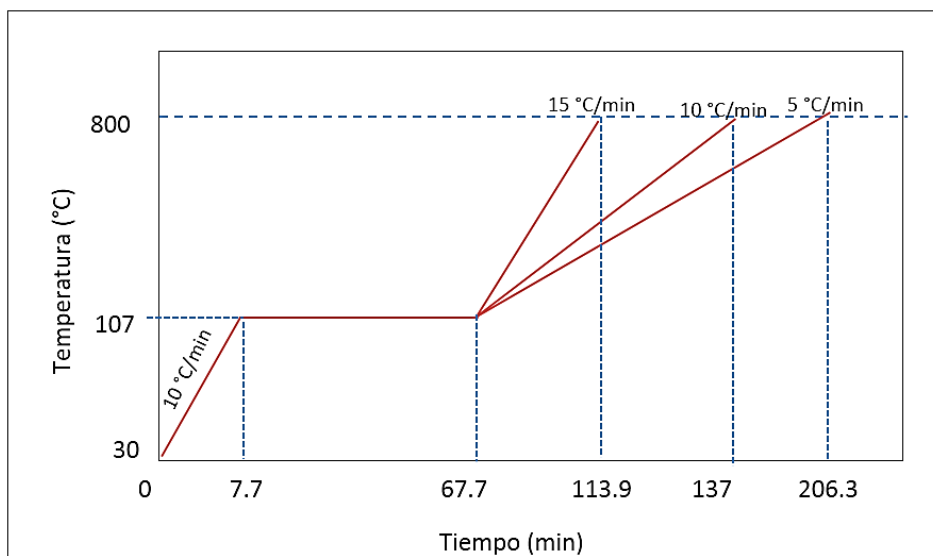
Este equipo de termogravimetría permite el análisis de la muestra en atmosfera inerte (N_2), aire sintético y Dióxido de Carbono (CO_2), tiene un flujo constante en 50mk/min ($P=101,325$ KPa, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Previamente a la realización de la prueba, las muestras fueron tratadas como se mencionó anteriormente en el proceso de torrefacción y pasaron por un proceso de secado justo antes de la aplicación de termogravimetría para garantizar que los resultados del experimento no se vieran alterados por factores externos de humedad.

4.11.1 Pruebas no isotérmicas torrefactadas. La prueba inicio a una temperatura de 30°C, con una rampa inicial de calentamiento de 10°C/min hasta una temperatura de 107°C, aplicando un periodo de secado de 60 minutos a esta temperatura, el peso de la muestra fue aproximadamente $9\text{ mg} \pm 0,5$.

Las pruebas a las muestras torrefactadas se hicieron en atmosferas de N_2 y aire sintético hasta una temperatura de 800 °C. El número de pruebas fue 1 por cada atmosfera y cada velocidad (5°C/min, 10°C/min y 15°C/min) siendo en total 6 pruebas, como lo indica la figura (26).

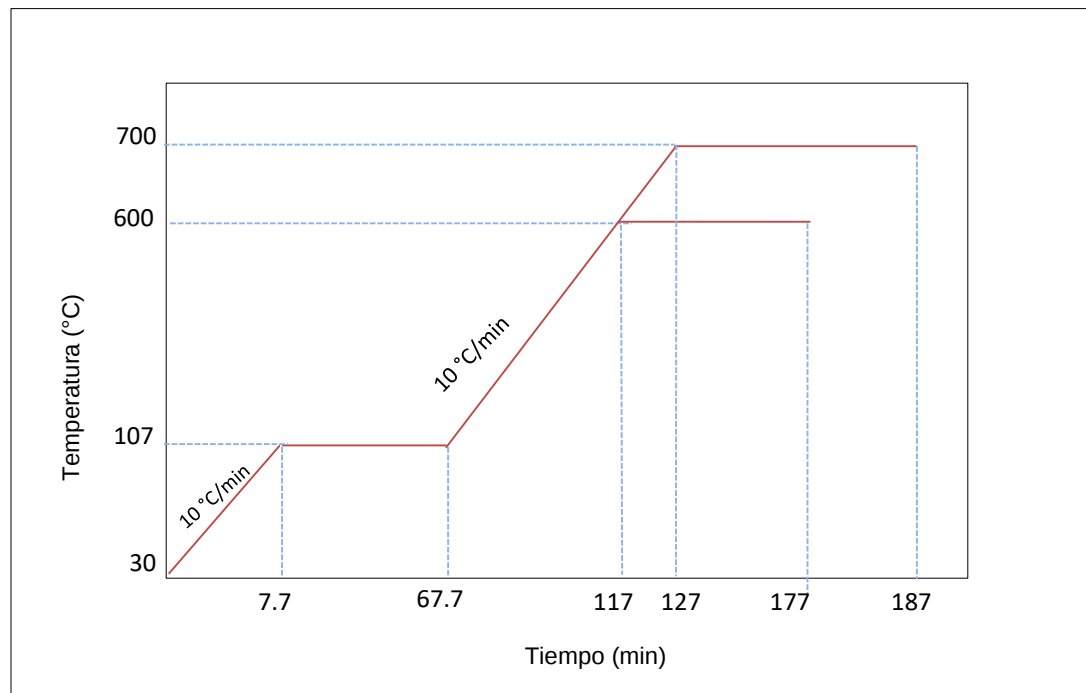
Figura 26. Modelo gráfico de las pruebas no isotérmicas torrefactadas.



4.11.2 Pruebas isotérmicas torrefactadas Las pruebas del proceso isotérmico a las muestras torrefactadas se hicieron en atmosferas de un 25% de CO_2 , con una inyección de 10% de N_2 (el cual no afecta en nada la aplicación de la prueba ya que este actúa como agente transportador del CO_2 , lo cual es una condición ya predeterminada del equipo, la misma cantidad que entra de nitrógeno será la misma que sale), con una tasa de calentamiento de 10°C/min y en temperaturas

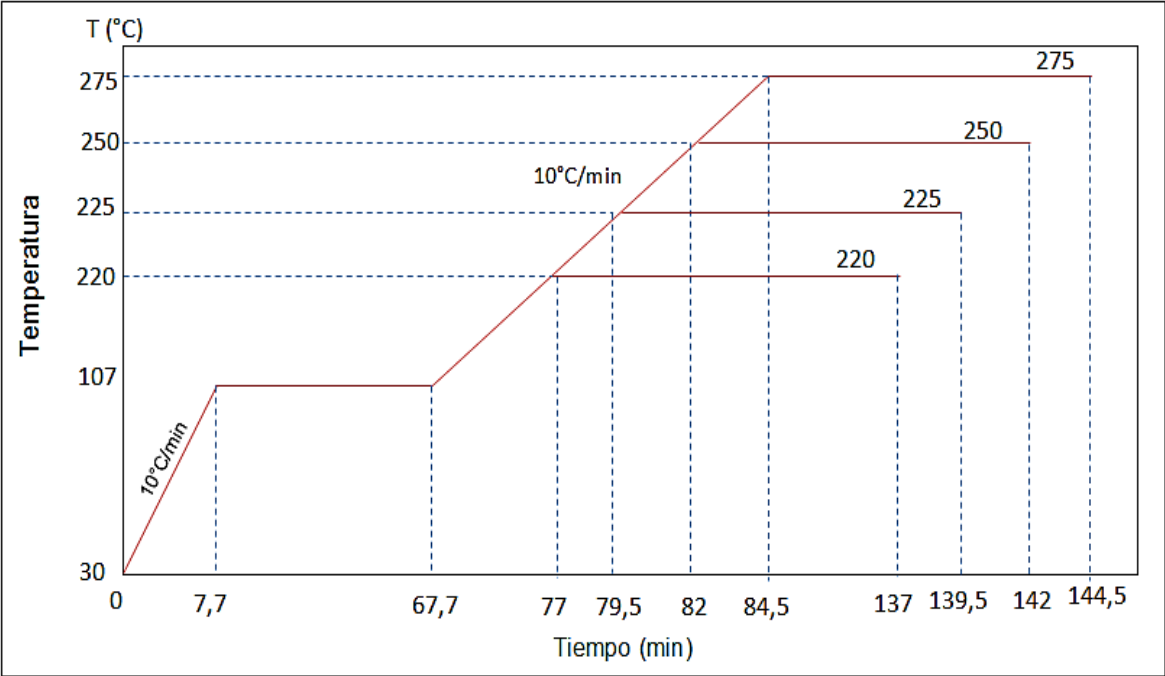
de $T = [600^{\circ}\text{C y } 700^{\circ}\text{C}]$, manteniendo por una hora cada temperatura como lo indica la figura (27). Se aplicó un periodo de secado de 60 minutos a una temperatura de 107°C , el peso de la muestra fue aproximadamente $9\text{ mg} \pm 0,5$.

Figura 27. Modelo grafico de las pruebas isotérmicas torrefactadas.



4.11.3 Pruebas isotérmicas masa seca sin torrefactor Las pruebas del proceso isotérmico a las muestras de secado sin torrefactor, se hizo en atmosfera de N_2 con una tasa de calentamiento de 10°C/min y en temperaturas de 200°C , 225°C , 250°C y 275°C , manteniendo por una hora cada temperatura como lo indica la figura. Siendo 4 pruebas en total. La cantidad de masa inicial para estas pruebas fue aproximadamente de 14 mg , con un periodo de secado de 60 minutos a una temperatura de 107°C como se evidencia en la figura (28).

Figura 28. Modelo grafico de las pruebas isotérmicas de la masa seca sin torrefactor.



5 MODELOS MATEMATICOS

5.1 PROCESO EXPERIMENTAL

Por medio de la cinética de la reacción se determinó una expresión matemática que permitió predecir la variación del proceso de descomposición térmica, para lo cual nos basamos en el modelo cinético de la ley de Arrhenius.

Inicialmente, se normalizaron los datos obtenidos en el análisis termogravimétrico, el cual nos dio valores de tiempo, temperatura, masa y el DTG (variación de la masa respecto al tiempo).

Se estableció a W como la masa normalizada obteniendo su valor de la siguiente manera:

$$w = \frac{m_t}{m_0} \quad (18)$$

Donde m_0 es la masa inicial, m_t es la masa en cualquier temperatura dada y m_f es la masa final.

También fue necesario tener la variación de la masa normalizada en el tiempo, como a continuación:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dm}{dt} \left(\frac{1}{m_i} \right) \quad (19)$$

Posteriormente se realizó la conversión experimental, que es la cantidad de masa que se va transformando (α_{exp}) como lo muestra la ecuación (20).

$$\alpha_{exp} = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_f} \quad (20)$$

y su respectiva variación respecto al tiempo ($\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{exp}$), donde, w_0 es la masa normalizada inicial, w es la masa normalizada a una temperatura y w_f es la descomposición final (ecuación (21)).

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{exp} = -\frac{dw}{dt} \left(\frac{1}{w_0 - w_f}\right) \quad (21)$$

La ley de Arrhenius, presentada en la ecuación (22), nos permitió determinar la energía de activación (E), con los parámetros cinéticos anteriormente mencionados; donde A es el factor pre exponencial (s⁻¹), R es la constante de gas universal (8,314 J / mol K), T es la temperatura absoluta en K, y f (α) es una función de conversión.

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = A \cdot [f(\alpha)] \cdot \left[\exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right) \right] \quad (22)$$

5.1.1 Resultados experimentales de las pruebas no isotérmicas torrefactadas.

- **Atmosfera de N2**

Este experimento fue desarrollado con las condiciones anteriormente mencionadas en el numeral 5.11. En la figura (29) y (30) representan las curvas de la variación de la masa normalizada con respecto a la temperatura (*W vs T*) y su derivada (*(dw / dt) vs T*), que se obtuvieron en las pruebas de termogravimetría, a las diferentes velocidades.

Se puede observar en la figura (29) las principales etapas del proceso para la descomposición de residuos orgánicos alimenticios: secado, liberación de volátiles y carbonización. La etapa de secado se evidencio entre la temperatura de laboratorio 30°C y 150 °C. La etapa de liberación de volátiles fue entre 280°C y 370°C para todas las velocidades, etapa en la cual fue registrada la mayor transferencia de masa. En la curva de la derivada de la masa normalizada figura (30) tuvo un máximo entre 290°C y 340°C para esta etapa en todas las

velocidades. También, en esta etapa los volátiles liberados son producto de reacciones de descomposición de los polímeros componentes de la biomasa. Las temperaturas superiores de 370°C representan el inicio de la etapa de carbonización, en la cual la pérdida de masa es poca, ya que el material liberó la mayoría de material volátil en la etapa anterior.

Figura 29. Masa normalizada vs T en velocidades de 5°C/min, 10°C/min y 15°C/min en atmosfera de Nitrógeno.

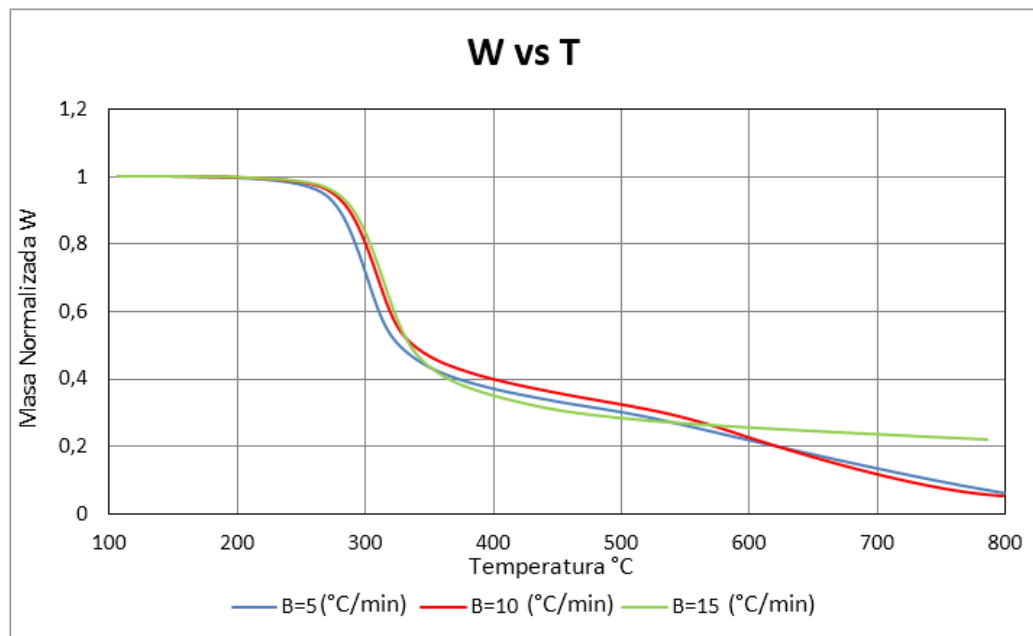
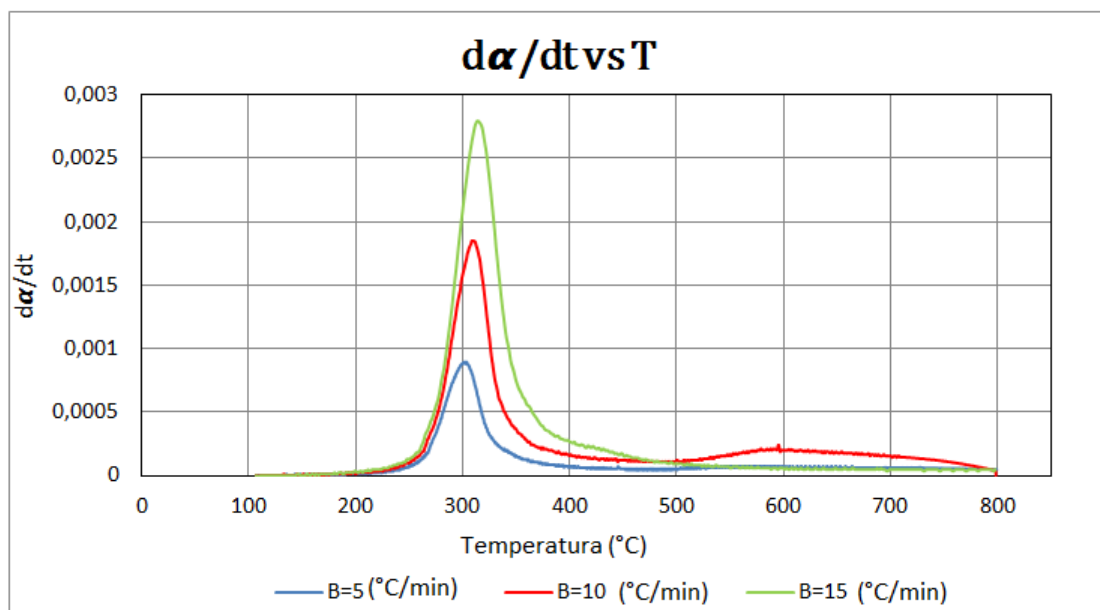


Figura 30. $d\alpha/dt$ vs T en atmosfera de Nitrógeno.



- **Atmosfera de Aire sintético**

Esta prueba fue desarrollada con las condiciones anteriormente mencionadas en el numeral (5.11.1). En las figuras (31) y (32) se representan las curvas de la variación de la masa normalizada con respecto a la temperatura (W vs T) y su derivada ((dw / dt) vs T) respectivamente, que se obtuvieron en las pruebas de termogravimetría a las diferentes velocidades.

Los resultados de descomposición en atmosfera de nitrógeno y aire sintético tienen un comportamiento similar, sin embargo, se puede evidenciar que en la muestra trabajada con atmosfera de aire sintético se tiene mayor velocidad de descomposición ya que presenta mayor número de picos y más pronunciados en comparación a la gráfica 30 que representa la velocidad de descomposición en atmosfera de nitrógeno donde estos son poco repetitivos y mucho más suaves en su trazo.

En la figura (31) la etapa de secado se presenta entre la temperatura de laboratorio 30°C y 150 °C. La etapa de liberación de volátiles fue entre 250°C y 340°C para todas las velocidades, etapa se registró la mayor transferencia de masa. En la curva de la derivada de la masa normalizada figura (32) tuvo un máximo entre 290°C y 320°C para esta etapa en todas las velocidades. Los puntos máximos son denominados picos. También, en esta etapa los volátiles liberados son producto de reacciones de descomposición de los polímeros componentes de la biomasa. Las temperaturas superiores de 400°C representan el inicio de la etapa de carbonización.

Figura 31. Masa normalizada vs T en velocidades de 5°C/min, 10°C/min y 15°C/min en atmosfera de Aire sintético.

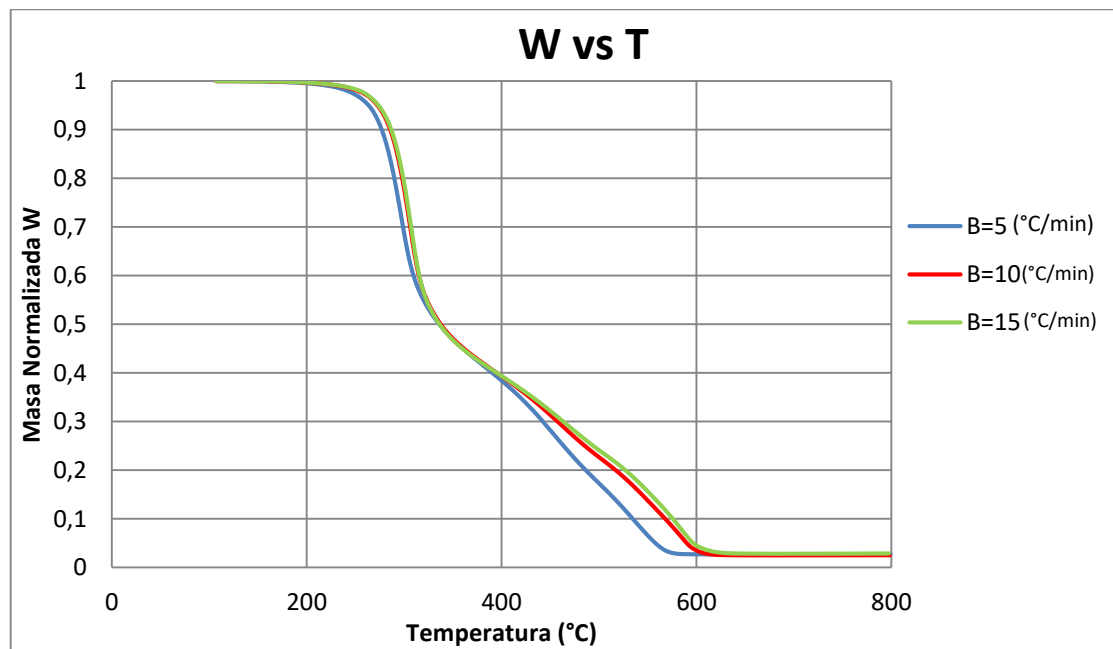
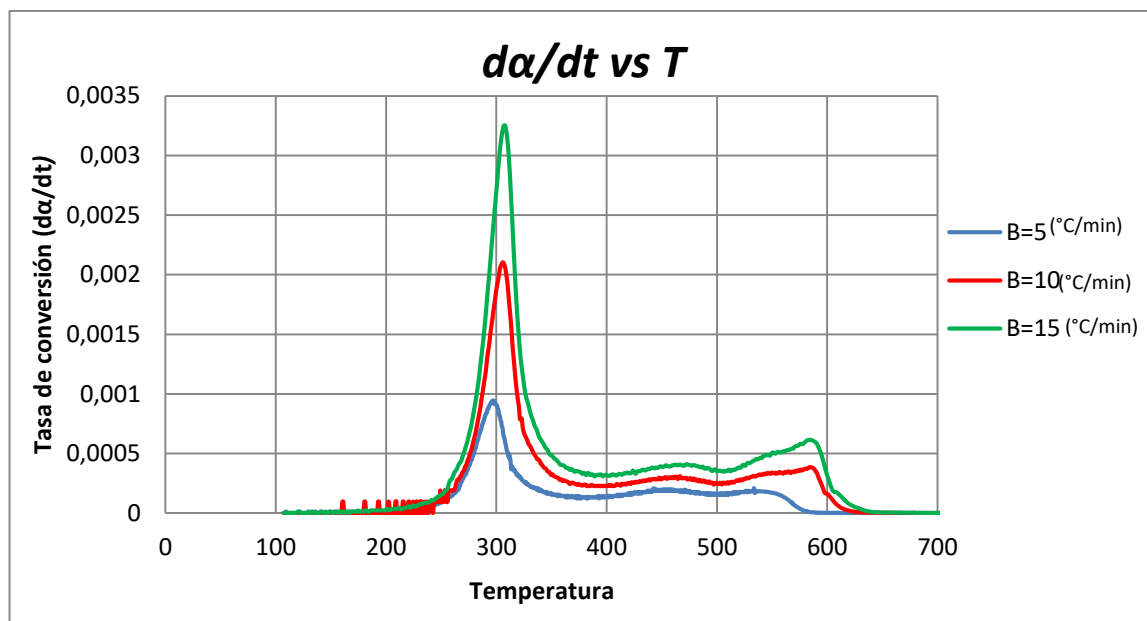
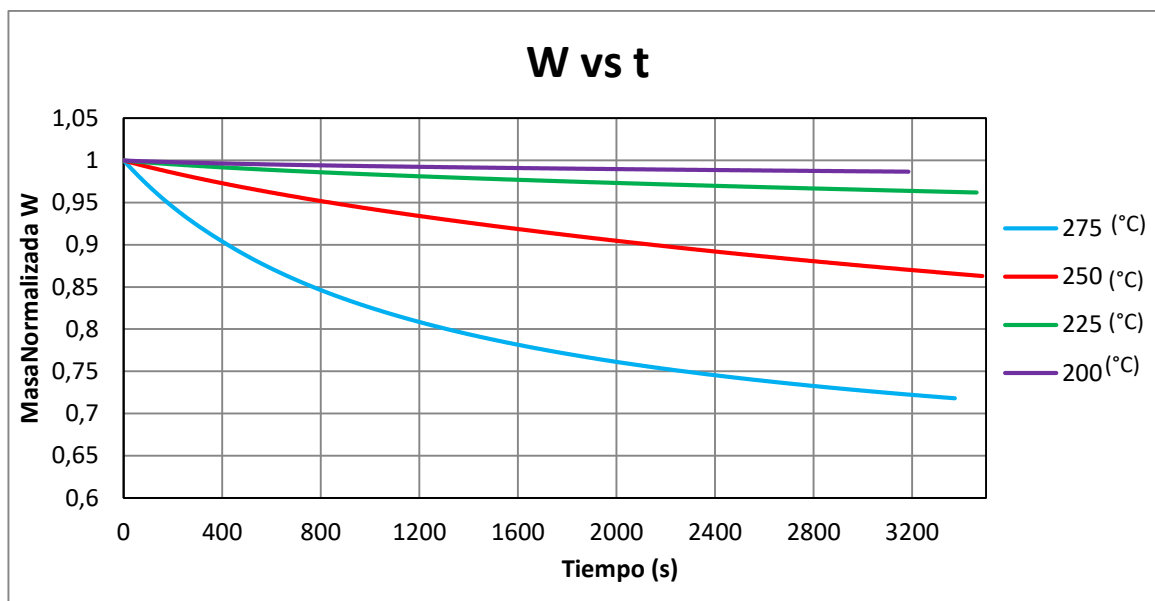


Figura 32. da/dt vs T en atmosfera de Aire sintético.



5.1.2 Resultados experimentales en las pruebas isotérmicas de la masa seca sin torrefactor. Esta prueba fue desarrollada con las condiciones anteriormente nombradas en el numeral (5.11.3), a continuación en la figura (33) se muestra como a mayor temperatura se tendrá mayor descomposición de masa, según lo indican los valores de masa normalizada, es decir, que para las temperaturas más bajas en este caso 200°C y 225°C la descomposición de masa es muy baja y lenta a comparación de la descomposición de masa que se puede evidenciar en las temperaturas de 250°C y 275°C

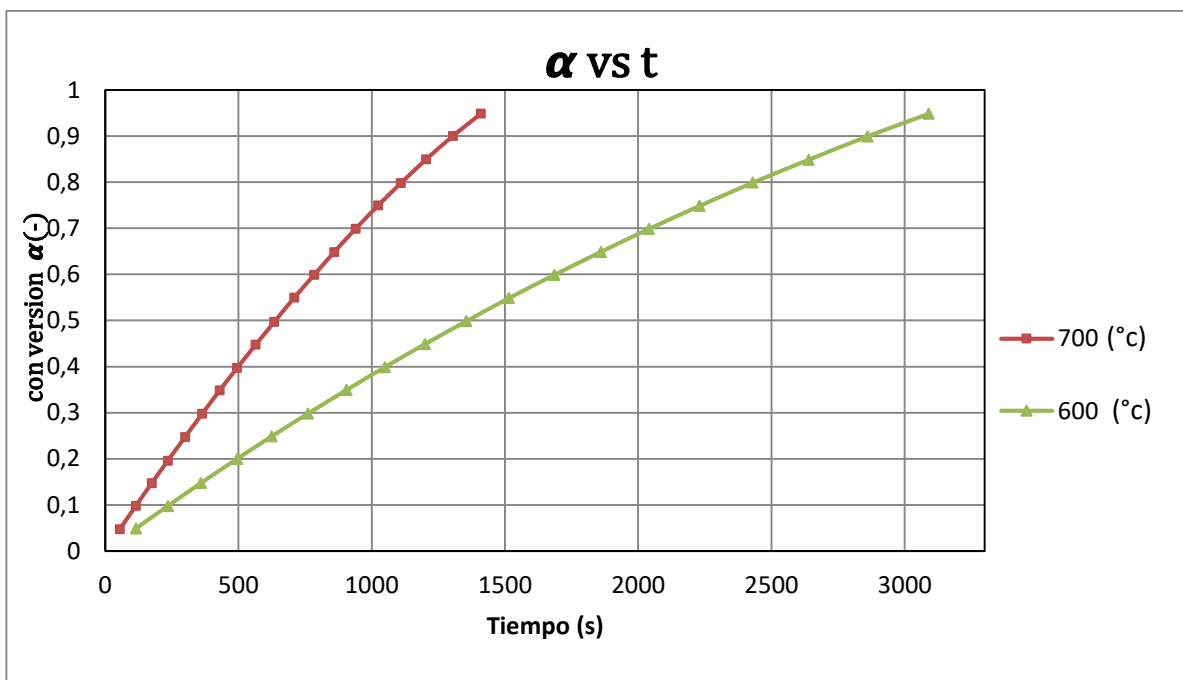
Figura 33. Masa normalizada vs tiempo



5.1.3 Resultados experimentales en las pruebas isotérmicas torrefactadas.

Manteniendo las condiciones nombradas en el numeral (5.11.2), se obtuvieron los siguientes resultados, se ha de aclarar que no solo se llevaron a cabo pruebas a 600°C y 700°C, también se realizaron pruebas isotérmicas a las muestras torrefactadas a temperaturas de 650°C y 700°C, las cuales presentaron algunas inconsistencias. A las pruebas anteriormente mencionadas se les realizó el modelamiento isoconvensional y de reacciones paralelas para predecir su comportamiento y así obtener los parámetros óptimos de modelamiento de las pruebas realizadas. En la figura (34) se presenta la representación de la conversión vs el tiempo de descomposición a cada temperatura trabajada.

Figura 34. Conversión vs tiempo de descomposición.



6 MODELOS CINETICOS

6.1 PRUEBAS NO ISOTÉRMICAS TORREFACTADAS

6.1.1 Modelo isoconversional. En este modelo se utilizaron los resultados obtenidos en las pruebas de termogravimetría en atmosfera de nitrógeno. Se aplicó en un rango entre 0,96 y 0,5 de masa normalizada aproximadamente, debido a que es el rango de descomposición presente en las pruebas, y se realizó en el software Microsoft Excel.

Friedman propuso un método diferencial utilizado en los estudios cinéticos en condiciones isotérmicas para resolver la ecuación de la ley de Arrhenius expresada en la ecuación (12):

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln A + \ln f(\alpha) - \left(\frac{E}{R \cdot T}\right) \quad (23)$$

Se evalúan niveles de conversión de α con sus respectivos tiempos, calculando $(d\alpha / dt)$ experimental utilizando la ecuación (21), este proceso se realiza para cada temperatura a estudiar, se evalúa en la función $\ln(d\alpha/dt)$ en función de $1 / T$. Al graficar $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ vs $\frac{1}{T}$ se obtiene como resultado una línea recta para cada velocidad de conversión, donde al tomar las pendientes y multiplicarlas por la constante universal de los gases R ($8,314 \text{ J/molK}$), el valor promedio genera como resultado la energía de activación E por nivel de conversión.

El resultado inicial de la energía de activación promedio fue de $E = 253,08878 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{molK}}\right)$ la cual fue determinada por el método isoconversional de Friedman (ANEXO (C)). Para determinar la función de conversión $f(\alpha)$ se

siguieron las indicaciones de la *International Confederation of Thermal Analysis and Calorimetry* (ICTAC) presentadas por Vyazovkin et al.³¹.

Algunos de los modelos de reacción para estado sólido son mostrados en la tabla (15).

Tabla 15. Modelos de reacción.

Modelo de Reacción	Símbolo	$f(\alpha)$	$g(\alpha)$
Ley de potencia	P1	$\frac{1}{4\alpha^2}$	$\frac{1}{\alpha^2}$
Ley de potencia	P2	$\frac{1}{3\alpha^2}$	$\frac{1}{\alpha^2}$
Ley de potencia	P3	$\frac{1}{2\alpha^2}$	$\frac{1}{\alpha^2}$
Ley de potencia	P4	$\frac{1}{2/3\alpha^2}$	$\frac{1}{\alpha^2}$
Reacción controlada de límite de fase: control de área	R2	$2(1-\alpha)^{\frac{1}{2}}$	$[1-(1-\alpha)^{\frac{1}{2}}]$
Reacción controlada de límite de fase: control de volumen	R3	$3(1-\alpha)^{\frac{2}{3}}$	$[1-(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}]$
Primer orden	F1	$(1-\alpha)$	$-\ln(1-\alpha)$
Avrami-Erofe'ev (m=2)	A2	$2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{1}{2}}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{1}{2}}$
Avrami-Erofe'ev (m=3)	A3	$3(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{2}{3}}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{2}{3}}$
Avrami-Erofe'ev (m=4)	A4	$4(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{3}{4}}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{3}{4}}$
Difusión unidimensional	D1	$\frac{1}{2\alpha}$	α^2
Difusión bidimensional	D2	$[- \ln(1-\alpha)]^{-1}$	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha) + \alpha$
Difusión tridimensional	D3	$\frac{3}{2}(1-\alpha)^{\frac{2}{3}}[1-(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}]^{-1}$	$[1-(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}]^2$
Difusión tridimensional Ginstling-Brounshtein	D4	$\frac{3}{2}(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}[1-(1-\alpha)^{\frac{2}{3}}]^{-1}$	$(1-2\alpha/3)-(1-\alpha)^{\frac{2}{3}}$

Fuente: RUEDA, Yesid; TANNOUS, Katia. Isoconversional kinetic study of the thermal decomposition of sugarcane straw for thermal conversion processes [en línea]. En: Bioresource Technology. Campinas: Universidad de Campinas, noviembre 2015, vol. 196. 4.p. [Consultado: 3 de febrero de 2019]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241501024X>

³¹: VYAZOVKIN, Sergey, et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data [en línea]. En: *Thermochimica acta*, 2011. vol. 520. nro. 1-2. p. 1-19. [Consultado el 12 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040603111002152>

La función $g(\alpha)$ es la solución de la integral de $(d\alpha/f(\alpha))$ al evaluar la función $g(\alpha)$ de la ecuación (24) en un 50% de conversión, es decir, cuando la conversión (α) es igual a 0,5. Así como, para el tiempo en la cual la conversión es de 0,5, como se representa en la siguiente ecuación (25):

$$g(\alpha) = A * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * T(\alpha) \quad (24)$$

$$g(\alpha) = A * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * T(\alpha_{0.5}) \quad (25)$$

Para poder eliminar el factor de frecuencia se divide la ecuación (24) entre la ecuación (25) como se refleja en la ecuación (26), la teoría esta descrita por $g(x)/g(x_{0.5})$ (ANEXO (C)) y el experimental por $t(\alpha)/t(\alpha_{0.5})$.

$$\frac{g(\alpha)}{g(0.5)} = \frac{A * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * T(\alpha)}{A * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * T(\alpha_{0.5})} = \frac{T(\alpha)}{T(\alpha_{0.5})} \quad (26)$$

En la figura (35) se presenta las curvas teóricas para algunos modelos de reacción integral ($D1, D2, D3$ y $D4$) de acuerdo con la tabla (15) que podrían simular el comportamiento experimental a las velocidades de calentamiento trabajadas. Según la gráfica se pudo notar que las funciones más próximas al comportamiento de casa velocidad son las representadas por $D2$ y $D3$, donde la curva $D3$ presento una desviación estándar de 0,307% en comparación de la curva $D2$ que tuvo una desviación del 0,2294%, siendo esta última la función elegida por tener mayor ajuste:

$$g(\alpha) = (1 - \alpha) \ln(1 - \alpha) + \alpha.$$

$$\text{Dándonos como función a } D2 = f(\alpha) = -\ln((1 - \alpha)^{-1})$$

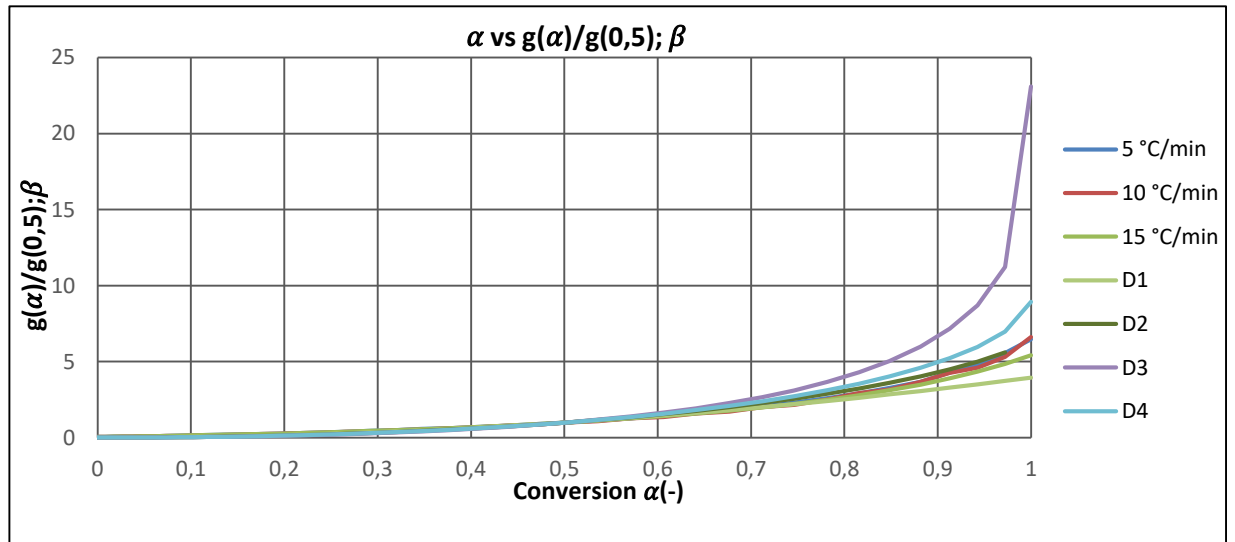
En esta investigación la función $f(\alpha) = -\ln((1 - \alpha)^{-1})$ proporciona la aproximación más cercana al comportamiento real de la reacción de descomposición de la biomasa.

Para predecir el comportamiento de la descomposición térmica de la biomasa utilizando los parámetros obtenidos anteriormente se utilizan las ecuaciones (27) y (28):

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = A \cdot [f(\alpha)] \cdot \left[\exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right)\right] \quad (27)$$

$$\alpha_{teorico} = \alpha_0 + \Delta t * \left(\frac{d\alpha}{dt}\right) \quad (28)$$

Figura 35. Representación gráfica de $(\alpha \text{ vs } g(\alpha)/g(0,5)); \beta$.



Para obtener el factor de frecuencia se realiza la linealización de la ecuación de la tasa de conversión en función de la inversa de la temperatura absoluta, como lo indica la figura (36).

Teniendo que:

$$b = \ln(A) \quad (29)$$

$$A = 1,7585E28$$

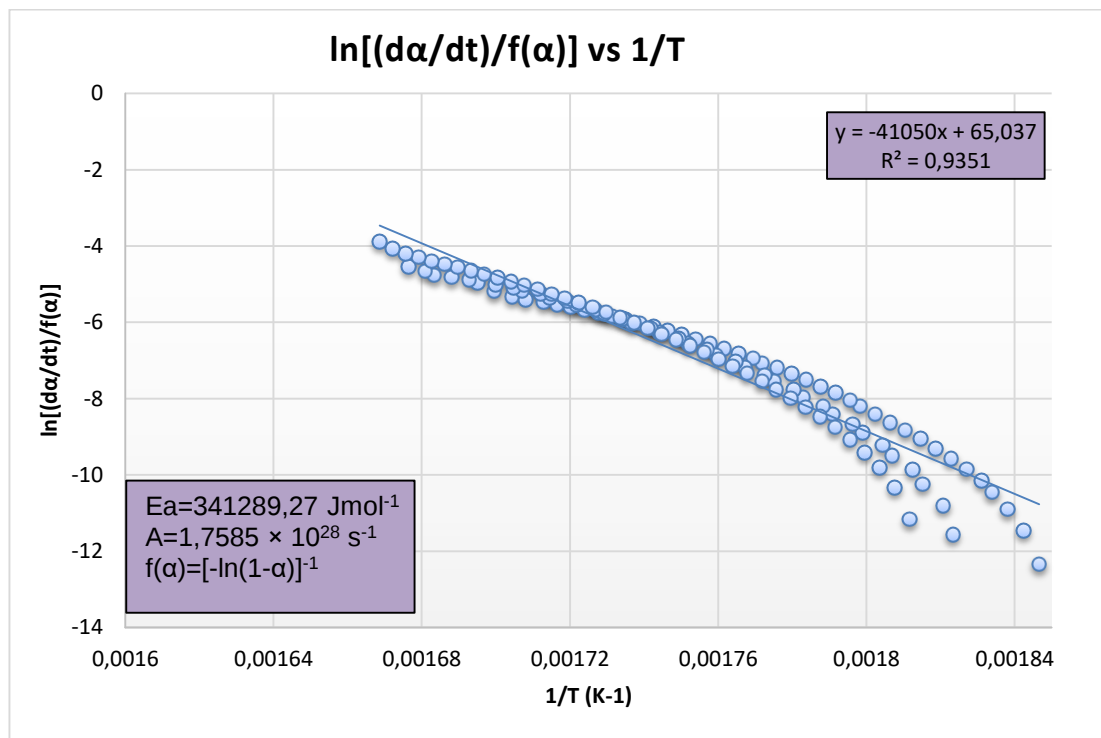
Y la energía de activación se obtuvo de la siguiente manera:

$$E = -a * R \quad (30)$$

Donde $a = -41050$ y R es la constante universal de los gases ($8,314 \frac{J}{molK}$)

Tenemos así que $E = 341,289 \frac{kJ}{molK}$.

Figura 36. Linealización de la ecuación de la tasa de conversión en función de la inversa de la temperatura.



A continuación (figura (37)) se muestra la representación de las curvas de conversión teórica y experimental en función de la temperatura a las diferentes velocidades de calentamiento estudiadas.

El modelo de reacción obtenido proporciona una descripción experimental del comportamiento de los residuos orgánicos alimenticios tratados en procesos térmicos. Como resultado global tendremos lo señalado en la tabla (16)

Figura 37. Representación teórica y experimental a diferentes temperaturas de calentamiento.

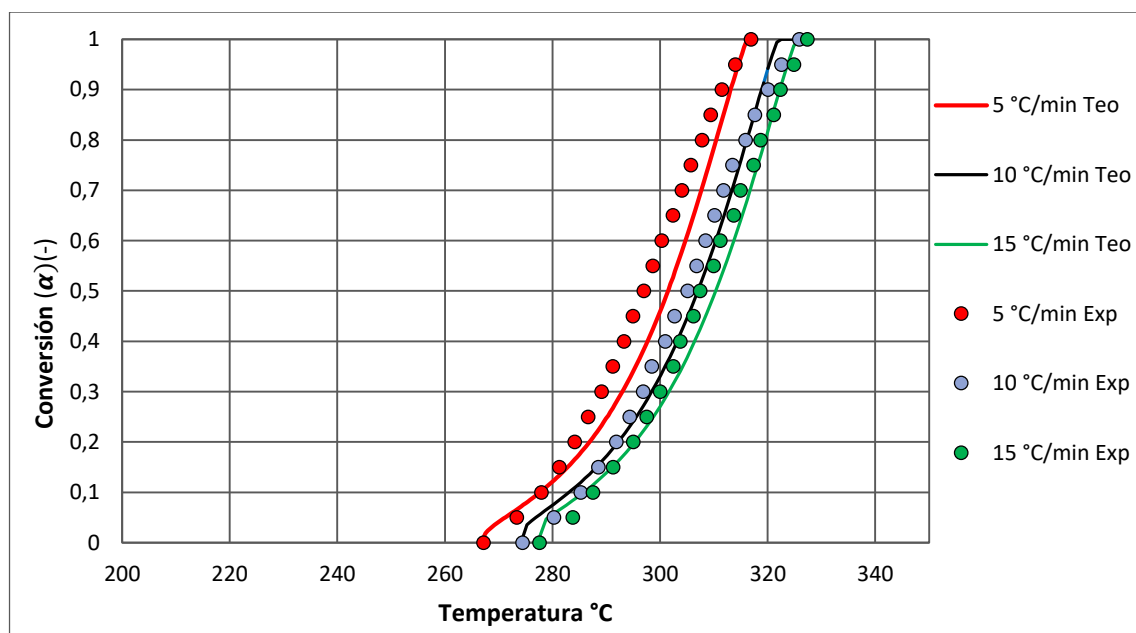


Tabla 16. Resultados globales de los parámetros cinéticos.

$f(\alpha)$	E	A	$APV(\%)$
$-\ln((1-\alpha)^{-1})$	341,289 (kJ/molK)	1,7585E28	0,2294

6.1.2 Modelo de reacciones paralelas. Se realizó la aplicación del modelo de reacciones paralelas para cada velocidad empleada (5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) en la atmosfera de N_2 , debido a que los residuos orgánicos alimenticios son considerados lignocelulosos están compuestos principalmente por

hemicelulosa, celulosa y lignina , el modelo de reacciones paralelas se implementó en la ecuación (31), donde $\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ es la conversión teórica, **HC** es la hemicelulosa, **C** la celulosa y **L** la lignina, cada una con su respectiva tasa de conversión: (ANEXO (C))

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = HC \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{HC} + C \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_C + L \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_L \quad (31)$$

Las tasas de conversión de cada pseudocomponente están dadas por la ecuación (32), donde: n es el orden de la reacción, α es la conversión teórica, A_i es el factor pre exponencial, E es la energía de activación, R es la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta manejada en Kelvin.

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_i = A_i(1 - \alpha) \left[\exp\left(\frac{-E_i}{R \cdot T}\right) \right] \quad (32)$$

Por medio del método de iteración de cuarto orden Runge Kutta se hizo la solución de las ecuaciones (31) y (32), ya que nos permite llegar a una solución numérica por medio de cuatro constantes señaladas en las ecuaciones (33) a (36).

$$k_{1n} = \left[A \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T_n}\right) \right] [(1 - \alpha)^n] \quad (33)$$

$$k_{2n} = \left[A \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \left(\frac{T_n + T_{n+1}}{2}\right)}\right) \right] [(1 - (\alpha_n + \frac{k_{1n}}{2}))^n] \quad (34)$$

$$k_{3n} = \left[A \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \left(\frac{T_n + T_{n+1}}{2}\right)}\right) \right] [(1 - (\alpha_n + \frac{k_{2n}}{2}))^n] \quad (35)$$

$$k_{4n} = \left[A \cdot \exp\left(\frac{-E}{R T_{n+1}}\right) \right] [(1 - (\alpha_n + k_{3n}))^n] \quad (36)$$

Una vez definidas las constantes se calcula el valor de la conversión (α), ecuación (37), donde P es el intervalo en que se tomaron los datos:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \left[\frac{P}{6} + (k_{1n} + k_{2n} + k_{3n} + k_{4n}) \right] \quad (37)$$

Para obtener una descomposición teórica que se ajustará a la descomposición experimental fue necesario manipular los valores de los factores pre exponenciales y la cantidad de masa normalizada presente en cada reacción, hasta que las dos reacciones fueran lo más similares posibles.

La función utilizada para el ajuste más cercano fue: $f(\alpha) = (1 - \alpha)$. Los resultados de los pseudocomponentes para cada una de las diferentes velocidades de 5°C/min, 10°C/min y 15°C/min, fueron los presentados en las tablas (17), (18) y (19) respectivamente; donde en las figuras (38), (40) y (42) se puede apreciar que el comportamiento teórico y experimental de la conversión (α) vs la temperatura se asemejan de manera óptima; de igual manera en las figuras (39), (41) y (43) se representó el comportamiento de la tasa de cambio de la conversión vs la temperatura.

- $\beta = 5^\circ\text{C}/\text{min}$

Tabla 17. Resultados Pseudocomponentes $\beta = 5^\circ\text{C}/\text{min}$

	A (1/s)	E (J/mol)	N	%
HEMICELULOSA	3,96E+11	1,50E+02	1	0,118
CELULOSA	1,52E+16	2,04E+02	1	0,345
LIGNINA	7,39	4,90E+01	3	0,537

Figura 38. Representación modelo experimental y teórico α vs T.

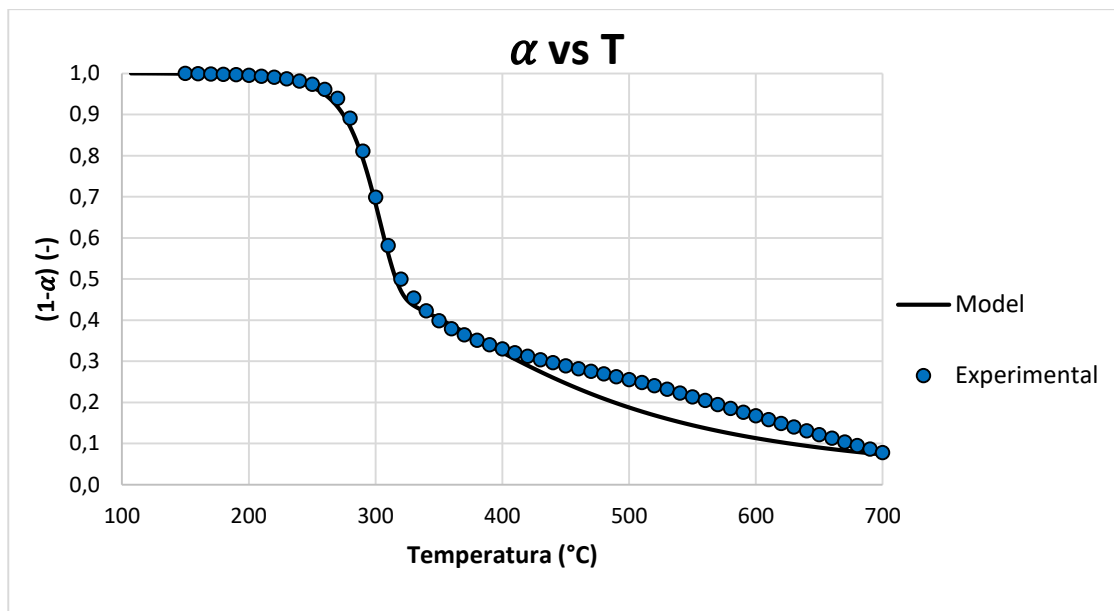
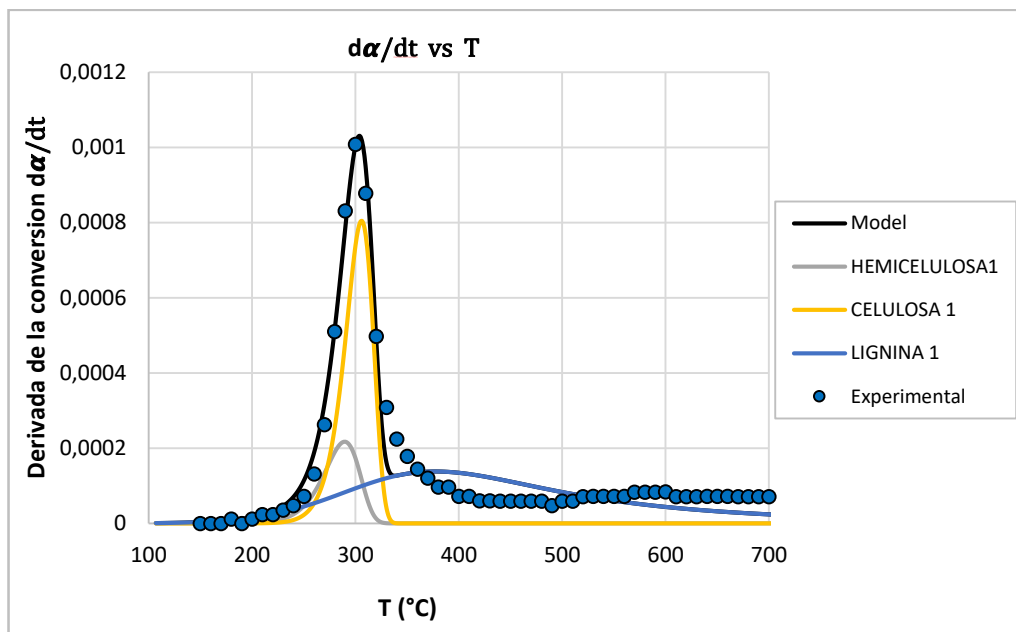


Figura 39. Tasa de conversión vs Temperatura.



- $\beta = 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Tabla 18. Resultados pseudocomponentes $\beta = 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

	A (1/s)	E (J/mol)	N	%
HEMICELULOSA	3,96E+11	1,50E+02	1	0,118
CELULOSA	1,52E+16	2,04E+02	1	0,345
LIGNINA	7,39	4,90E+01	3	0,537

Figura 40. Representación modelo experimental y teórico α vs T.

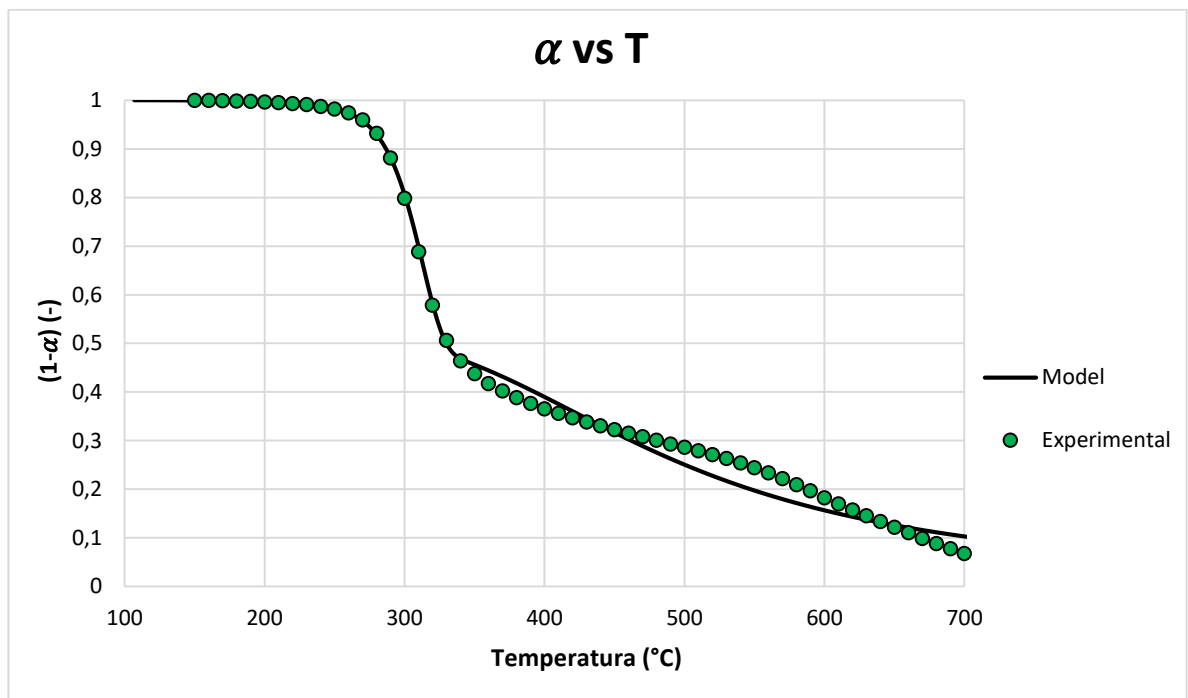
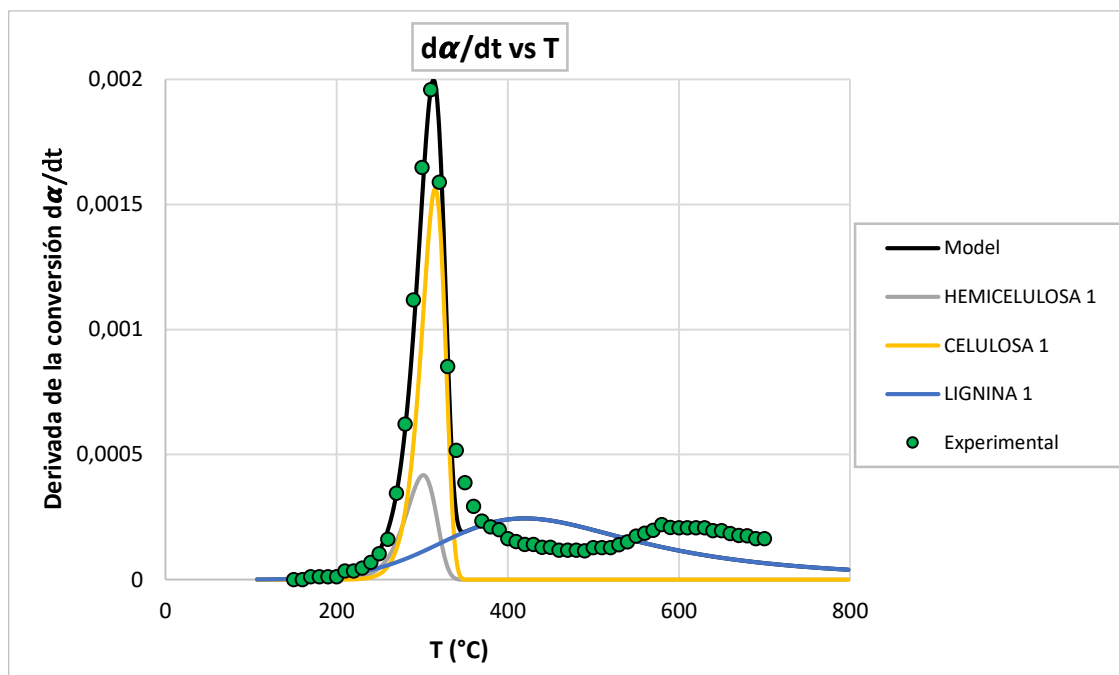


Figura 41. Tasa de conversión vs Temperatura.



- $\beta = 15^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Tabla 19. Resultados pseudocomponentes $\beta = 15^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

	A (1/s)	E (J/mol)	N	%
HEMICELULOSA	3,96E+11	1,50E+02	1	0,2581993
CELULOSA	1,52E+16	2,04E+02	1	0,345
LIGNINA	3,27E+01	4,90E+01	3	0,3968007

Figura 42. Representación modelo experimental y teórico α vs T.

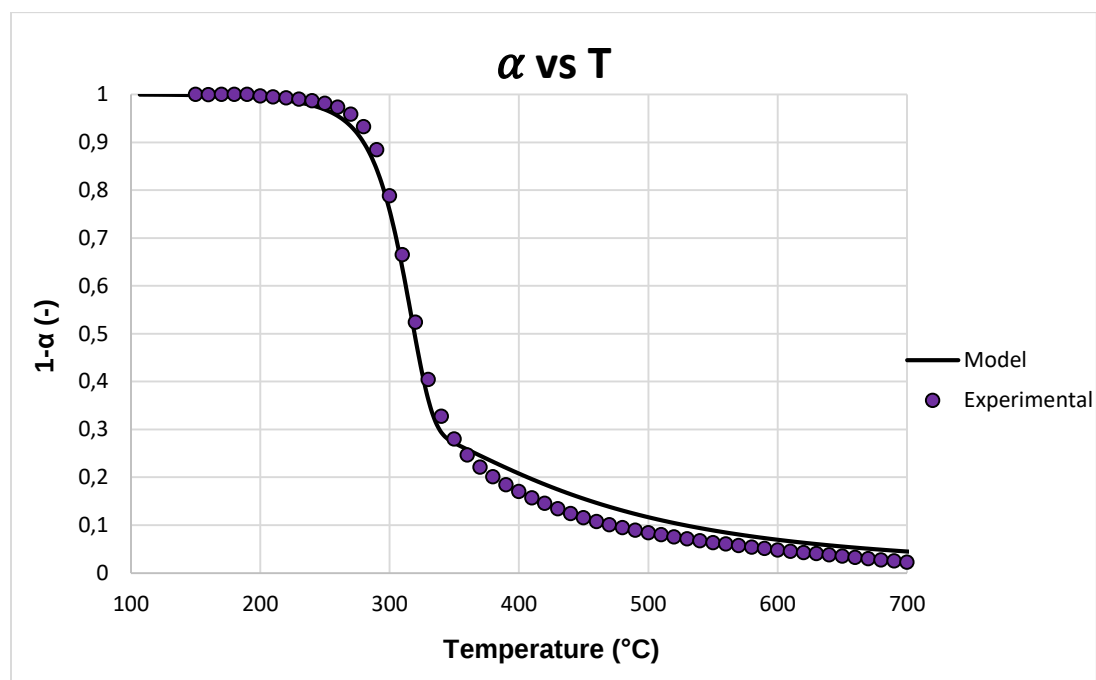
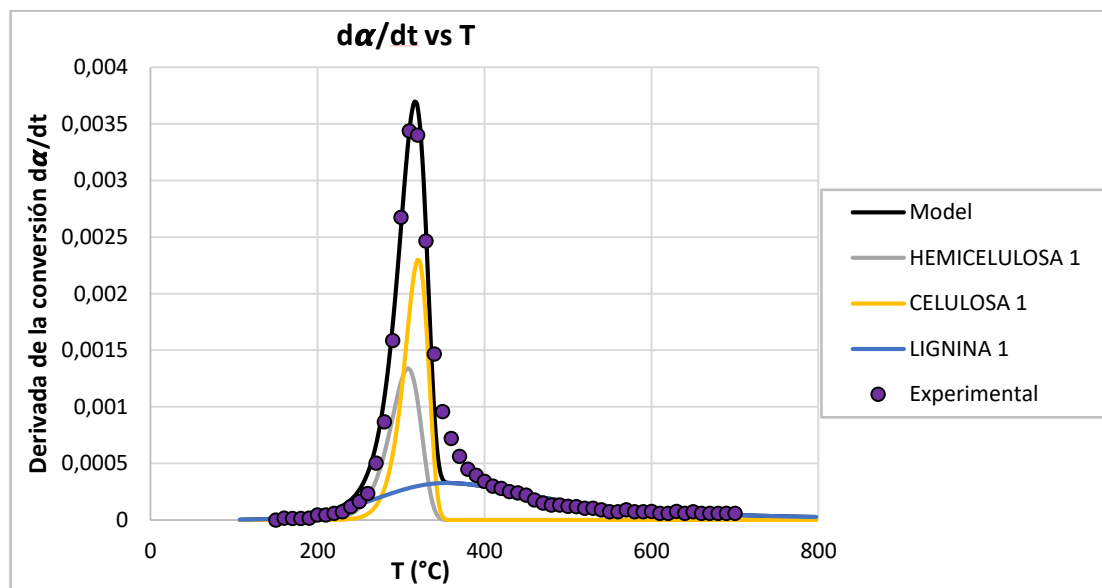


Figura 43. Tasa de conversión vs Temperatura.



6.2 PRUEBAS ISOTÉRMICAS DE LA MASA SECA SIN TORREFACTAR

6.2.1 Modelo isoconversional. Para el caso del modelo isoconversional de las pruebas isotérmicas se llevó a cabo de forma similar al anterior, haciendo un cambio en la estructura de la ecuación de Arrhenius (ecuación 22), moviendo la función de conversión hacia el término del lado izquierdo y el diferencial del tiempo hacia el lado derecho de la ecuación.

$$\left(\frac{d\alpha}{f(\alpha)}\right) = A * \left[\exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right)\right] dt \quad (38)$$

Para este modelo y la obtención de la energía de activación, el factor pre exponencial se tomó en cuenta solo las tres últimas temperaturas (275°C , 250°C y 225°C) debido a que el rango de masa normalizada a los 200°C era muy corto respecto a los demás (figura 32), sin embargo, se agregó al final del modelamiento.

Una vez normalizados los valores obtenidos de la masa, calculada la tasa de conversión, la derivada de la misma y el hallazgo de la pendiente para el valor de la energía de activación promedio, se obtuvo un valor de $E_{prom} = 21,48411 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{molK}}\right)$. (ANEXO (D))

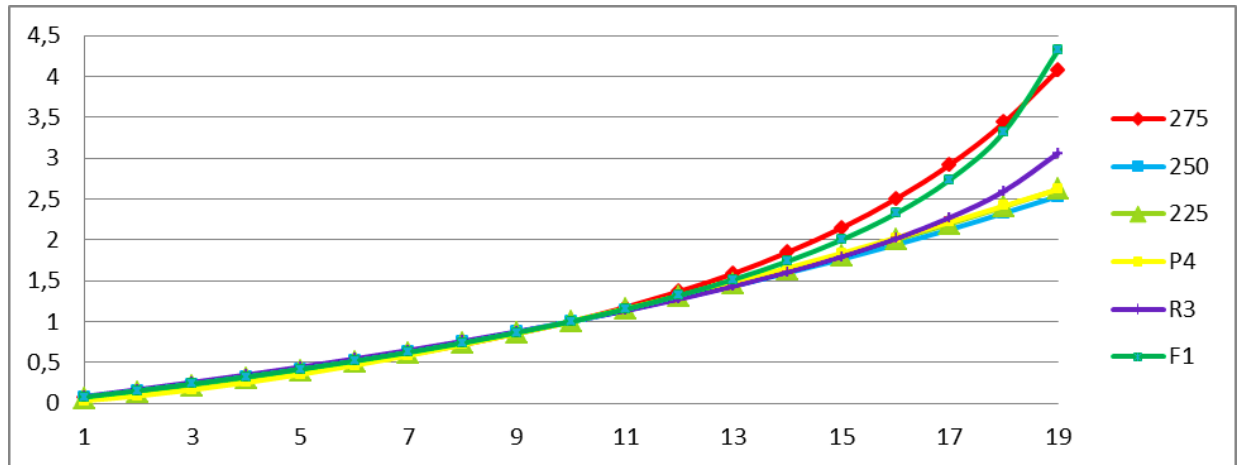
Realizando la eliminación del factor frecuencia:

$$\frac{g(\alpha)}{g(0.5)} = \frac{A * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * t(\alpha)}{A * \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) * t(\alpha_{0.5})} = \frac{t(\alpha)}{t(\alpha_{0.5})} \quad (39)$$

De igual forma se seleccionó un modelo de reacción de la tabla (15) que predijera el comportamiento de la biomasa en esta prueba.

A continuación, en la figura (45) se presenta el comportamiento de las temperaturas (275°C, 250°C y 225°C) con algunos modelos de reacción para la selección del que más ajuste su comportamiento.

Figura 44. Representación gráfica de las diferentes funciones de $g(\alpha)/g(0,5)$



Para la selección del modelo de reacción se tomó en cuenta el menor valor de desviación estándar entre los graficados, donde se obtuvo un valor de 4,893 para $P4$, 19,52 para $R3$ y 13,379 para $F1$, eligiendo así la función que modeló la curva $P4 = f(\alpha) = (\frac{2}{3}(\alpha)^{-1/2})$. Para la obtención del factor de frecuencia se realizó la linealización de la ecuación de la tasa de conversión, obteniendo así el valor del factor pre exponencial $A = 0,04319$ y el de la energía de activación de $E = 21,484$ ($\frac{KJ}{molK}$).

Tabla 20. Resultados modelo isoconversional.

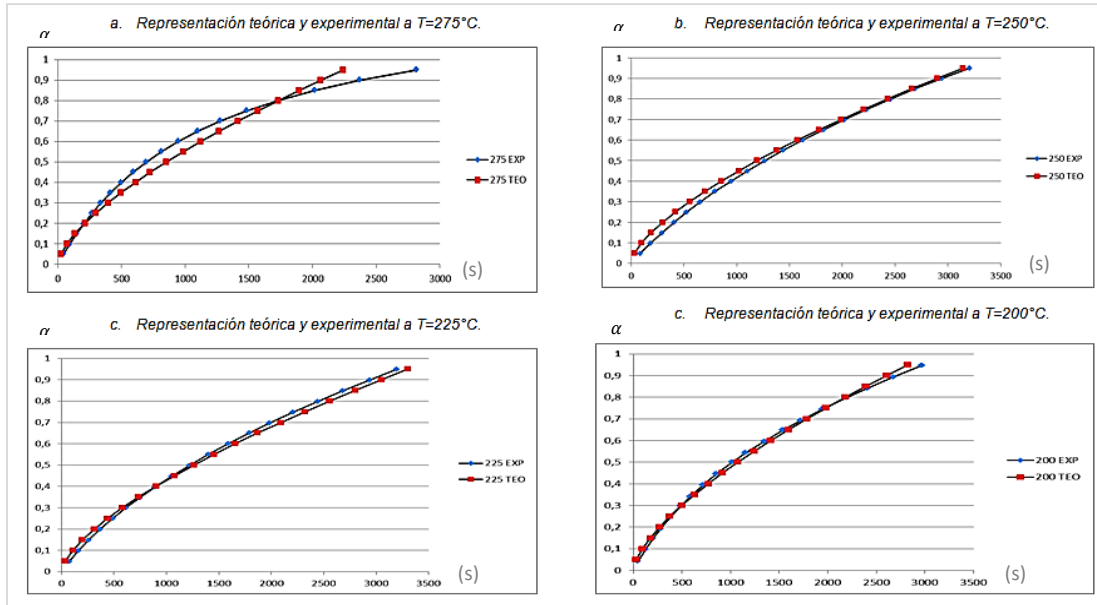
$f(\alpha)$	E	A	$APV(\%)$
$(\frac{2}{3}(\alpha)^{-1/2})$.	21,484 (kJ/molK)	0,04319	15,97

Para el caso de este modelo fue necesario ajustar con un valor diferente de factor pre exponencial cada temperatura, para así obtener un comportamiento experimental y teórico lo más cercano posible, teniendo como resultados los siguientes valores:

Tabla 21. Resultados factor pre exponencial para las diferentes temperaturas.

Temperatura °C	Factor pre-exponencial A (S^{-1})
275	0,046
250	0,041
225	0,05
200	0,077

Figura 45. Representación gráfica α vs tiempo del modelo isoconversional de cada temperatura.



Se observó que cada vez que la temperatura disminuye el factor pre exponencial aumenta, teniendo valores más similares en las temperaturas de 275°C , 250°C y 225°C .

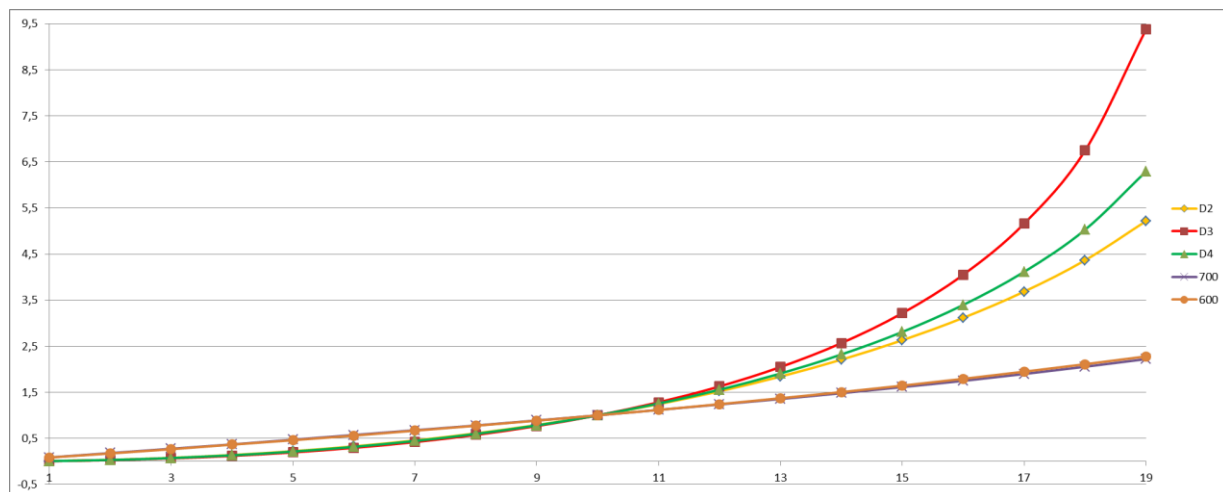
6.3 PRUEBAS ISOTÉRMICAS DE LA MUESTRA TORREFACTADA

6.3.1 Modelo isoconversional. Este modelo se llevó a cabo de la misma manera que el modelo del ítem 7.2.1, después de la normalización de los valores obtenidos de la masa, calculada la tasa de conversión, la derivada de la misma y el hallazgo de la pendiente para el valor de la energía de activación promedio, se obtuvo un valor de $E_{prom} = 55,547 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{molK}} \right)$.

De igual forma se seleccionó un modelo de reacción de la tabla 16 que predijera el comportamiento de la biomasa en esta prueba.

A continuación, en la figura (46) se presenta el comportamiento de las temperaturas (600°C y 700°C) con algunos modelos de reacción para la selección del que más ajuste su comportamiento.

Figura 46. Representación gráfica de las diferentes funciones de $g(\alpha)/g(0,5)$



Para la selección del modelo de reacción que más se asemeja se tomó en cuenta el menor valor de desviación estándar entre los graficados, donde se obtuvo un valor de 4,588 para $D3$ y 9,316 para $D4$, eligiendo así la función que modeló la

curva $D3 = f(\alpha) = \left(\frac{3}{2}(1 - \alpha)^{-\frac{2}{3}} * \left(1 - \left((1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} \right) \right) \right)^{-1}$. Para la obtención del factor

de frecuencia se realizó la linealización de la ecuación de la tasa de conversión, obteniendo así el valor del factor pre exponencial $A = 0,04248$ y el de la energía de activación de $E = 53,4424 \left(\frac{KJ}{molK} \right)$.

Tabla 22. Resultados modelo isoconversional.

$f(\alpha)$	E	$A (S^{-1})$
-------------	-----	--------------

$\left(\frac{3}{2}(1-\alpha)^{-\frac{2}{3}} * \left(1 - \left((1-\alpha)^{\frac{1}{3}}\right)\right)^{-1}\right)$	53,4424 (kJ/molK)	0,04248
---	-------------------	---------

El comportamiento obtenido anteriormente no fue favorable para la investigación, por lo cual se implementó un ajuste para el modelo, donde se obtuvieron los resultados en la figura (47) para los datos de 600°C y en la figura (48) para los datos de 700°C, respectivamente. Los datos fueron ajustados con la función $f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$.

Figura 47. Conversión vs tiempo para una temperatura de 600(°C).

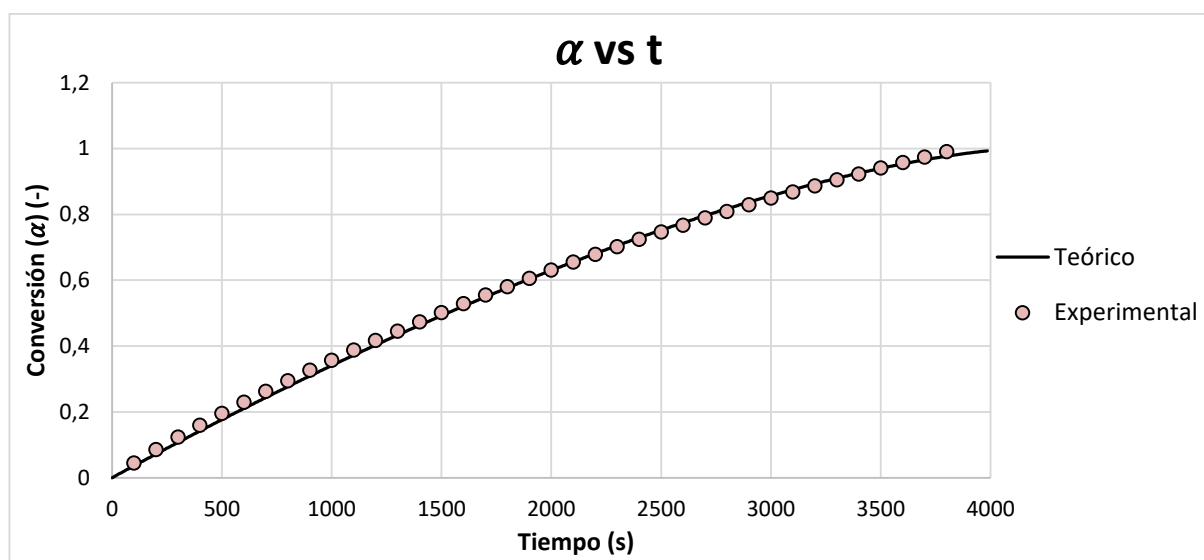
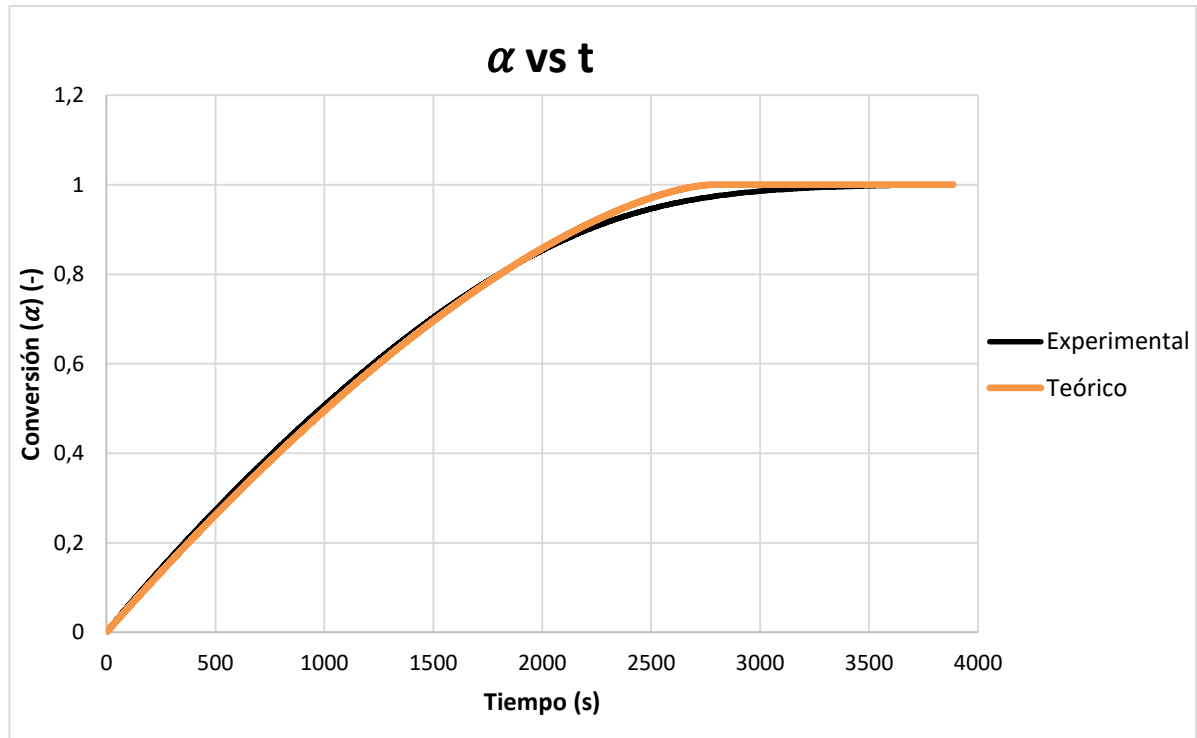


Figura 48. Conversión vs tiempo para una temperatura de 600(°C).



6.3.2 Modelo de reacciones paralelas. El modelo se llevó a cabo de la misma manera que en el numeral (7.1.2). La función utilizada para el modelamiento fue $f(\alpha) = (1 - \alpha)$ donde se obtuvieron los siguientes resultados para la temperaturas de 600°C y 700°C presentados en las tablas (22) y (23) respectivamente; donde en las figuras (49) y (51) se puede apreciar que el comportamiento teórico y experimental de la conversión (α) vs tiempo se asemejan de manera óptima; de igual manera en las figuras (50) y (52) se representó el comportamiento de la tasa de cambio de la conversión vs la tiempo.

- 600 (°C)

Tabla 23.Resultados modelo de reacciones paralelas a 600°C.

	A (1/s)	E (J/mol)	N	%
HEMICELULOSE	3.96E+11	1.50E+05	1	0.3
CELULOSE	1.52E+16	2.04E+05	1	0.4
LIGNINA	3.00E+01	4.90E+04	2	0.3

Figura 49. Representación de conversión vs tiempo.

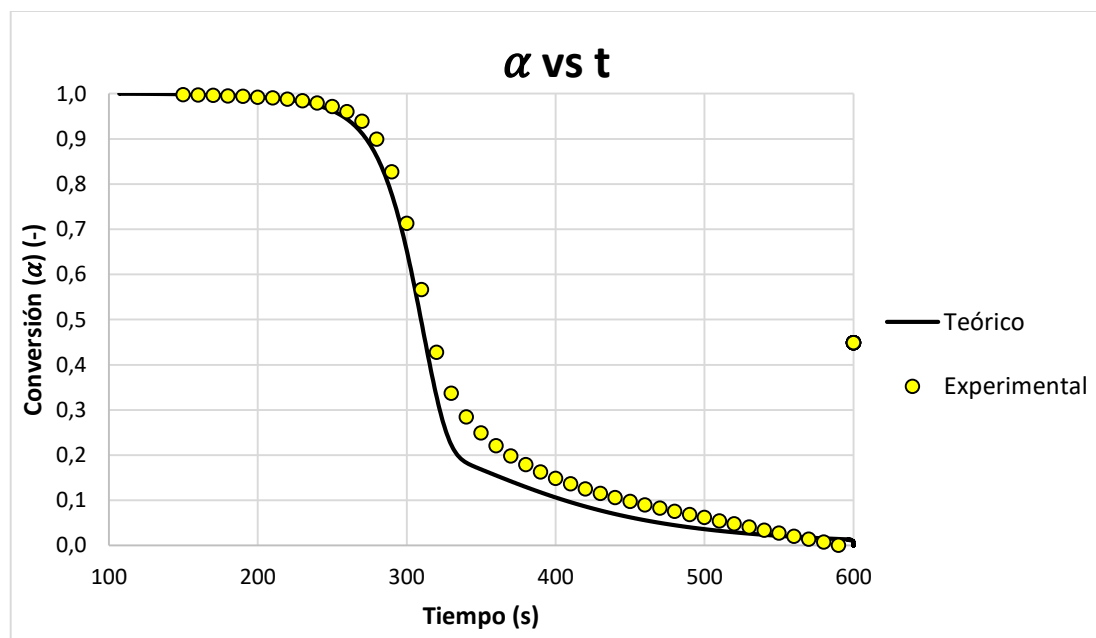
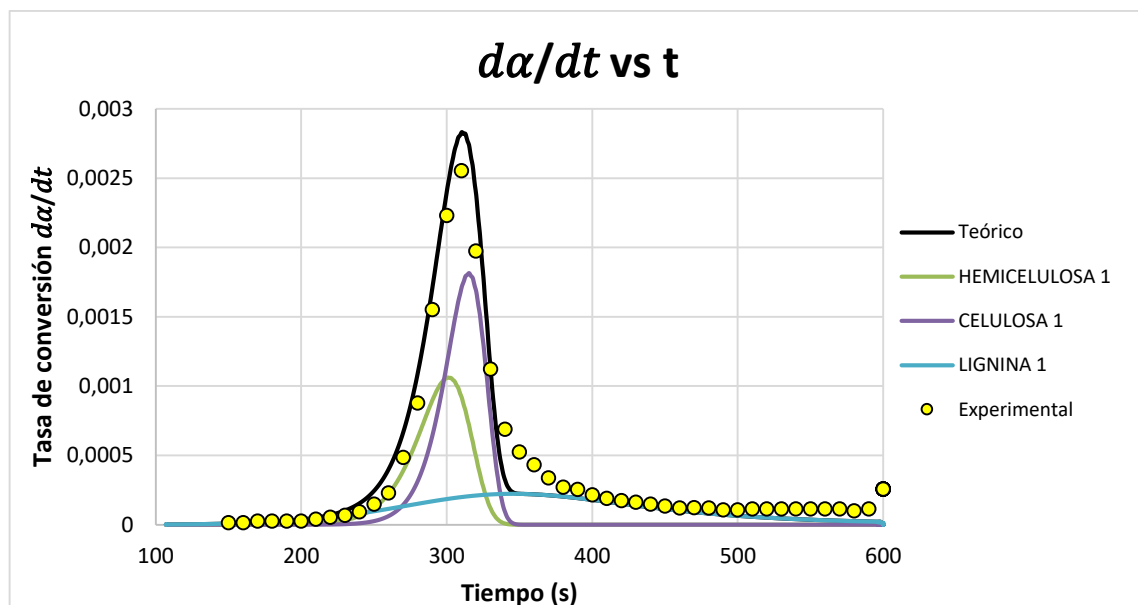


Figura 50. Representación de la tasa de conversión vs el tiempo.



- 700 (°C)

Figura 51. Resultados modelo de reacciones paralelas a 700°C.

	A (1/s)	E (J/mol)	N	%
HEMICELULOSE	3.96E+11	1.50E+05	1	0.118
CELULOSE	1.52E+16	2.04E+05	1	0.345
LIGNINA	7.39E+00	4.90E+04	3	0.537

Figura 52. Representación conversión vs tiempo.

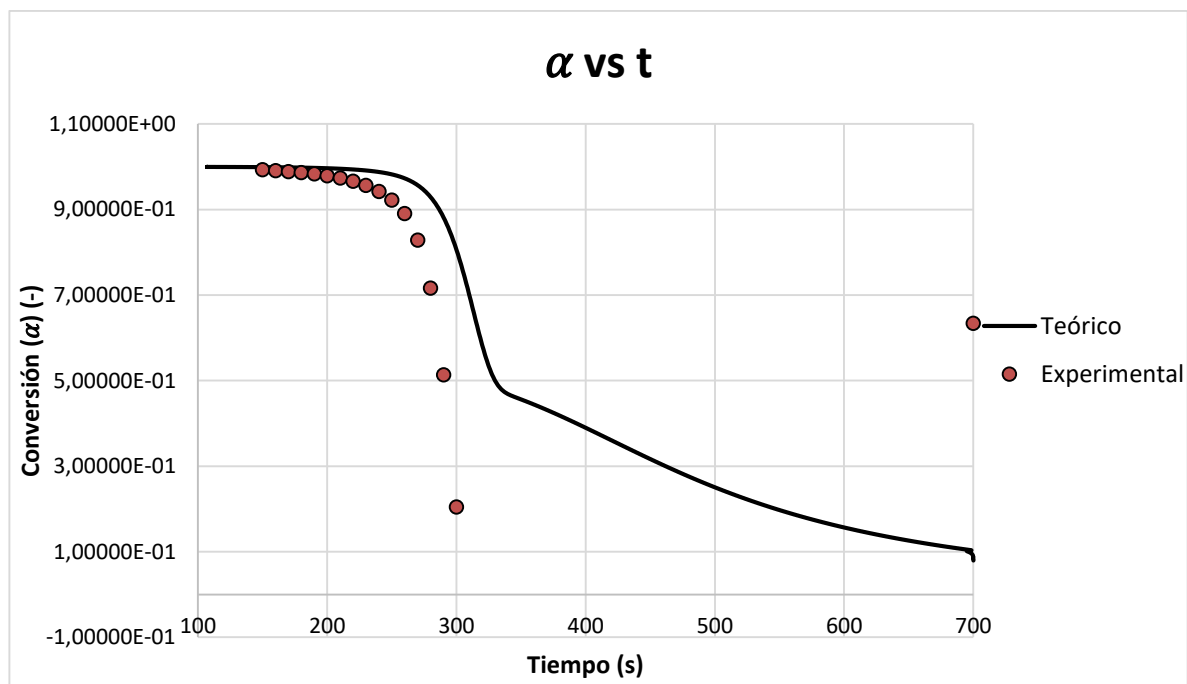
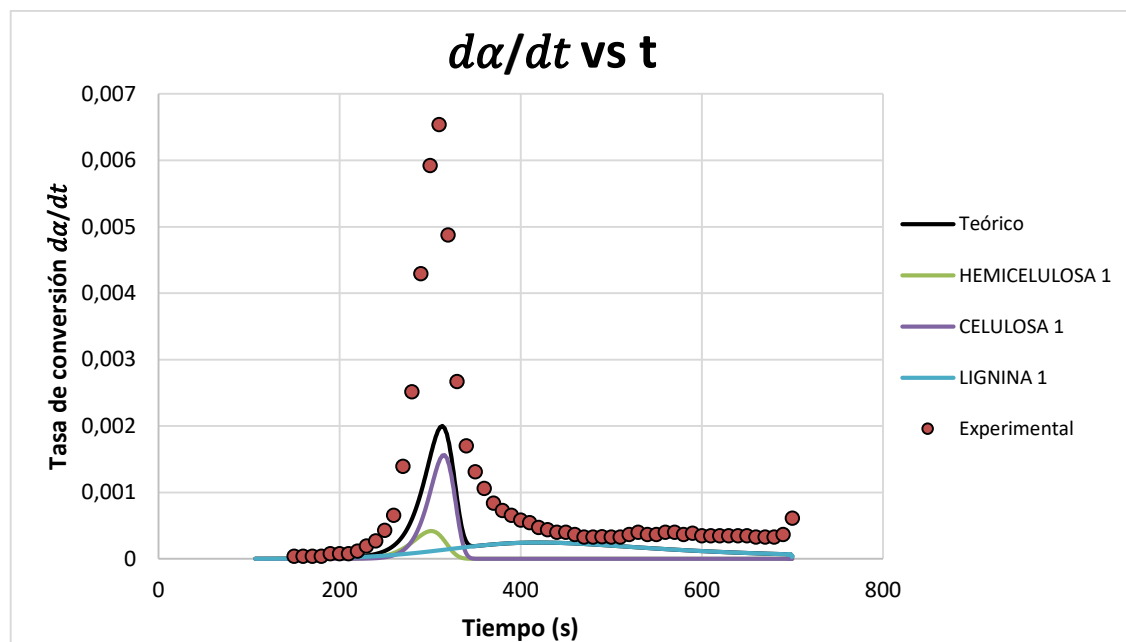


Figura 53. Representación de la tasa de conversión vs el tiempo.



7 GASIFICACIÓN

Según, Páez Duque, Santiago. Suárez Acelas, Iván pueden identificarse tres zonas fundamentales en el proceso de gasificación: la zona de medición, flujos y presión; zona de reacción y zona de análisis³². Las tuberías utilizadas para la conexión del banco de pruebas de gasificación son de acero inoxidable de diámetro 1/4", 316/316L sin soldadura (Swagelok®).

Del compresor general que supe el edificio de laboratorios que cuenta con una presión de 7 bar, procede la línea de gas comprimido. También se encuentra un rotámetro de área transversal de 150 mm marca Cole-Palmer en la zona de medición para la línea de aire comprimido proveniente del compresor, esta zona tiene un manómetro que controla la presión del sistema.

Un reactor tubular de cuarzo de 30 mm de longitud; y 12mm y 9,5 mm de diámetro externo e interno respectivamente, compone la zona de reacción, este se encuentra de forma horizontal, siendo calentado con un mini horno tubular (Carbolite MTF 10/15/130).

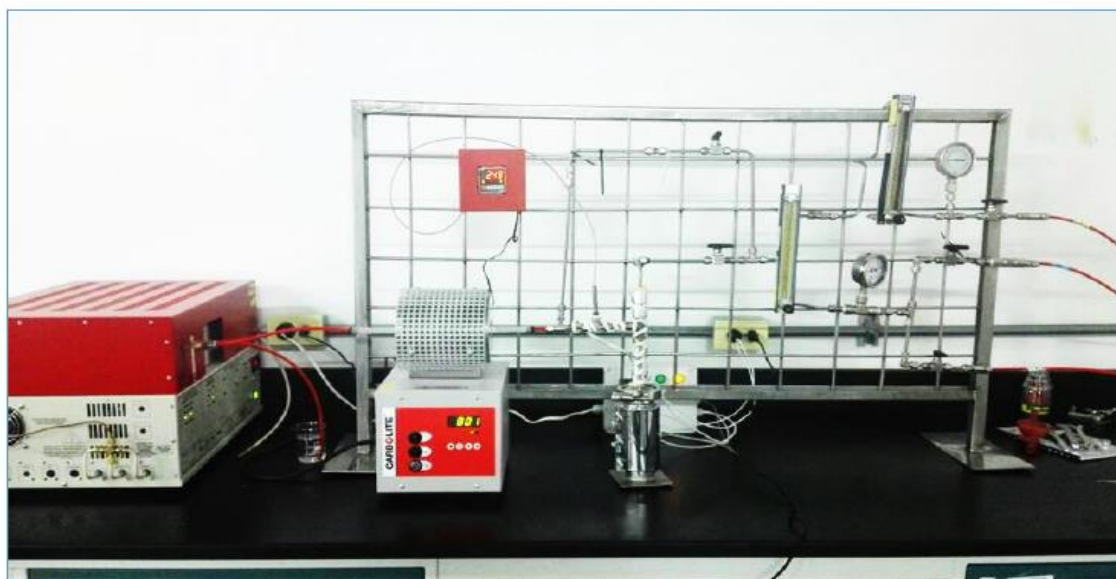
La biomasa sería cargada como un lecho fijo y es soportado en lana de cuarzo, según lo establecido por Páez Duque, Santiago y Suárez Acelas, Iván³³ se utilizan en los extremos capas de alúmina para la mayor extracción posible de alquitranes generados en la etapa de liberación de volátiles y así proteger el cromatógrafo de gases de posibles daños.

³² PÁEZ, Santiago y SUAREZ, Iván. Evaluación de una unidad piloto a escala laboratorio de vapor reformado usando bajas concentraciones de agua. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2016.

³³ DUQUE PAEZ, Santiago y SUARES ACELAS, Ivan. Evaluación de una unidad piloto a escala laboratorio de vapor reformado usando bajas concentraciones de agua. Trabajo de investigación Ingeniería Mecánica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica ,2019. p 31-33.

Ya para la zona de análisis se cuenta con un cromatógrafo de gases SR18610C, el cual usa como gas de arrastre helio (He), y para la detección en línea de los productos de reacción se encuentra acopado a la salida del reactor. El cromatógrafo se encuentra equipado con dos columnas empacadas de separación, una tipo Hayesep-D y otra de tamiz molecular MS-13X, las dos con una longitud de 6 in. Además, tiene un detector TCD (Thermal Conductivity Detector) y un detector HID (Helium Ionization Detector), que son monitoreados por el software PeakSimple 4.44. En la figura (50) se puede apreciar el montaje del banco de pruebas empleado para pruebas de gasificación en el laboratorio de caracterización de sólidos (305), ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 54. Banco de pruebas de gasificación.



La parte experimental de nuestra investigación de gasificación no fue viable realizarla ya que la biomasa tiene productos cárnicos, y los aminoácidos (las unidades que forman las proteínas), los azúcares y la creatina o creatininas

(sustancias que se encuentran en los músculos) cuando reaccionan a altas temperaturas producen las aminas heterocíclicas (AHC) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) sustancias bastante pesadas que producen daños severos en los reactores, y estos equipos son bastante delicados y costosos³⁴.

³⁴ INSTITUTO NACIONAL DEL CANCER [Sitio Web]. Estados Unidos. Sustancias químicas en la carne cocinada a altas temperaturas y el riesgo de cáncer. [Consultado: 20 de Agosto de 2019]. Disponible en : <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/dieta/hoja-informativa-carne-cocinada>

8 MODELO TERMODINAMICO DE LA GASIFICACION

Con este modelo (ANEXO (B)) se buscó predecir el rendimiento máximo que puede alcanzar el producto de la reacción en las condiciones deseadas. El siguiente modelo proporciona una composición del gas que se obtendría en un proceso de gasificación, sin tener en cuenta la geometría del gasificador. Se utilizó un modelo de equilibrio termodinámico para el estudio del proceso de combustión y gasificación.

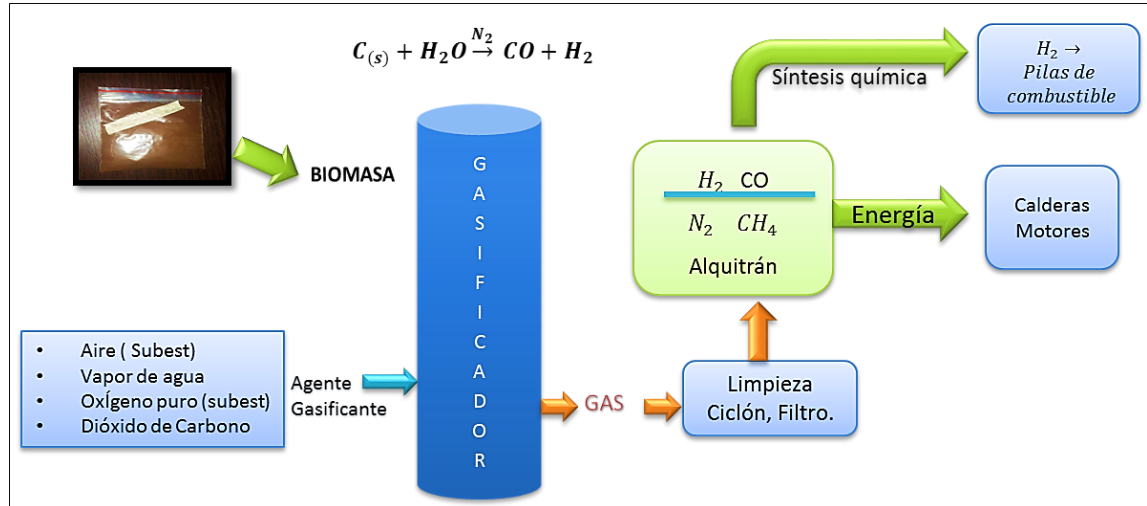
Como desarrollo del modelo termodinámico se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis basadas en el trabajo “*Modelado matemático de un gasificador de cisco de café de lecho fijo Downdraft*”³⁵:

- La gasificación se simulo en un solo paso en estado estacionario.
- El modelo se consideró adiabático.
- Se consideró un modelo cero dimensional.
- Las reacciones presentes alcanzan el equilibrio químico.
- Todos los gases se consideran ideales.
- El reactor opera en su entrada y salida a presión atmosférica.
- Las cantidades azufre, cloro, y extractivos son despreciables.
- No se considera la producción de alquitranes.
- Todo el oxígeno reacciona en el proceso de gasificación.
- Se supone que el gas producto de la gasificación solo está compuesto por $CO, CO_2, H_2O, CH_4, N_2$ y H_2 .
- No se considera la producción de cenizas.

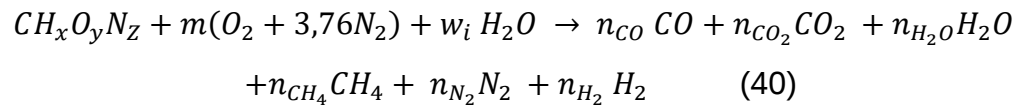
En la figura (55) se puede apreciar el proceso de la biomasa.

³⁵ ABAUNZA, Álvaro; GARCÍA, Kevin. *Modelado matemático de un gasificador de cisco de café de lecho fijo Downdraf*. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2019. p 99-104.

Figura 55. Comportamiento de la biomasa en el proceso de gasificación.



Utilizando el aire como agente de reacción se planteó el modelo de equilibrio estequiométrico, en la ecuación (40) se representa la reacción de la biomasa con el agente de reacción y el vapor de biomasa.



Donde $CH_xO_yN_z$, m , w_i , n_{CO} , n_{CO_2} , n_{H_2O} , n_{CH_4} , n_{N_2} y n_{H_2} será la fórmula química de la biomasa, cantidad de aire en base molar, cantidad de agua presente en la biomasa y moles de los componentes del gas producto (CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , N_2 y H_2), respectivamente.

Es necesario conocer la composición elemental de la biomasa para el planteamiento de la formula química de la biomasa, aquí se utilizó el análisis elemental hallado anteriormente en la sección (5.10) (*Análisis elemental*). Para la determinación de la cantidad de átomos de hidrogeno, oxígeno y nitrógeno

presentes en la biomasa por cada átomo de carbono se plantearon las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{H\% * PM_C}{C\% * PM_H} \quad (41)$$

$$y = \frac{O\% * PM_C}{C\% * PM_O} \quad (42)$$

$$z = \frac{N\% * PM_C}{C\% * PM_N} \quad (43)$$

Donde $C\%$, $H\%$, $O\%$, $N\%$, PM_C , PM_H , PM_O y PM_N son la composición elemental y la masa molecular de cada elemento.

Para el contenido de humedad de la biomasa se tomó como resultado el promedio final obtenido de las muestras de humedad en la sección (5.1) (*Análisis de humedad*). Se necesita hallar la cantidad de agua por Kmol de biomasa.

$$w_i = \frac{PM_{bms} * w}{PM_{H_2O} * (1 - w)} \quad (44)$$

$$PM_{bms} = 1 * PM_C + x * PM_H + y * PM_O + z * PM_N \quad (45)$$

Siendo w_i , w , PM_{bms} y PM_{H_2O} la cantidad de agua que entra al sistema, el contenido de humedad de la biomasa, el peso molecular de la biomasa y el peso molecular del agua, respectivamente.

También se necesitó calcular la cantidad de aire que gasta el proceso, teniendo que plantear una relación de equivalencia (ϕ), que es la relación aire combustibles real $((A/F)_{real})$ y estequiométrico $((A/F)_{esteq})$, como lo indica la ecuación (46).

$$\varphi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{real}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{esteq}} \quad (46)$$

Teniendo:

$$\begin{aligned} \left(\frac{A}{F}\right)_{real} &= \frac{m_{areal}}{m_{bio}} \quad ; \quad m_{airel} = m * 4,76 * M_{air} \\ \left(\frac{A}{F}\right)_{esteq} &= \frac{m_{aesteq}}{m_{bio}} \quad ; \quad m_{aesteq} = a_T * 4,76 * M_{air} \\ \varphi &= \frac{m}{a_T} \end{aligned} \quad (47)$$

Siendo m_{areal} , m_{aesteq} , m_{bio} , a_T y M_{air} son la masa de aire real, masa de aire estequiométrico, masa de la biomasa, cantidad de aire estequiométrico, y la masa molar del aire, respectivamente.

Por medio del balance de masa del proceso de combustión estequiométrico se obtendrá la cantidad de aire estequiométrico necesario para que ocurra la combustión completa.

$$a_T = 1 + \frac{x}{4} + \frac{w_i}{2} - \frac{y}{2} \quad (48)$$

Para realizar la solución de la ecuación (22) se hizo el planteamiento de un balance atómico para el hidrogeno, oxigeno, nitrógeno y carbón.

$$1 = n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} \quad (49)$$

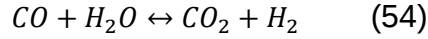
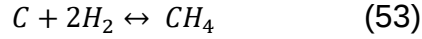
$$x + 2 * w_i = 2 * n_{H_2O} + 4 * n_{CH_4} + 2 * n_{H_2} \quad (50)$$

$$y + 2 * m + w_i = n_{CO} + 2 * n_{CO_2} + n_{H_2O} \quad (51)$$

$$z + 3,76 * 2 * m = 2 * n_{N_2} \quad (52)$$

De este balance de masa se tendrían tan solo 4 ecuaciones de 6 que se necesitan para realizar el equilibrio de masa, estableciendo así las dos restantes del

equilibrio de reacciones de metanación y el cambio de agua-gas que se presentan el proceso de gasificación.



Se supuso el equilibrio termodinámico para la zona de gasificación, asumiendo estos como gases ideales y llevando a cabo el proceso a 1 atm de presión. Para lo cual las constantes de equilibrio fueron:

$$K_{pM} = \frac{n_{CH_4} * n_{tot}}{n_{H_2}^2} \quad (55)$$

$$K_{pWG} = \frac{n_{CO_2} * n_{H_2}}{n_{H_2O} * n_{CO}} \quad (56)$$

Siendo, $n_{tot} = n_{CH_4} + n_{H_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} + n_{CO}$

Es necesario determinar las constantes de equilibrio definiéndolas en función de Gibbs:

$$\ln(K) = \left(\frac{-\Delta G_T^\circ}{R_u * T} \right) \quad (57)$$

$$-\Delta G_T^\circ = \sum_{i=1}^n v_i * \bar{g}_{Ti}^\circ \quad (58)$$

$$\bar{g}_{Ti}^\circ = \bar{h}_{Ti} - T * \bar{s}_{Ti} \quad (59)$$

$$\bar{h}_{Ti} = \bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298K} \quad (60)$$

$$\bar{s}_{Ti} = \bar{s}_f^\circ + \bar{s} - \bar{s}_{298K} \quad (61)$$

Donde $-\Delta G_T^\circ$ es la energía libre de Gibbs del producto que comprende n especies, v_i es el coeficiente estequiométrico de cada reacción, $\bar{g}_{Ti}^\circ$ es la energía libre de Gibbs para cada especie en particular. $\bar{h}_f^\circ$, $\bar{s}_f^\circ$, $\bar{h}$, $\bar{s}$, $\bar{h}_{298K}$ y $\bar{s}_{298K}$ son la entalpía estándar de formación, la entropía estándar de formación, la entalpía a la temperatura especificada, la entropía a la temperatura especificada, la entalpía

estándar molar a la temperatura de referencia y la entropía estándar molar a la temperatura de referencia, respectivamente.

Se debe calcular la temperatura para lo cual es necesario realizar un balance de energía en el sistema, donde la energía que entra al sistema HR será igual a la energía que sale HP.

$$HR = \bar{h}_{f\ bio}^{\circ} + m * \bar{h}_{f\ O_2}^{\circ} + m * 3,76 * \bar{h}_{f\ N_2}^{\circ} + \bar{h}_{f\ H_2O}^{\circ} \quad (62)$$

$$HP = n_{CH_4} * \bar{h}_{CH_4} + n_{H_2} * \bar{h}_{H_2} + n_{CO_2} * \bar{h}_{CO_2} + n_{H_2O} * \bar{h}_{H_2O} + n_{N_2} * \bar{h}_{N_2} + n_{CO} * \bar{h}_{CO} \quad (63)$$

$$\bar{h}_{f\ bio}^{\circ} = LHV_{mol\ bm\ bs} + \left(\bar{h}_{f\ CO_2}^{\circ} + \frac{x * \bar{h}_{f\ H_2O}^{\circ}}{2} \right) \quad (64)$$

Donde $\bar{h}_{f\ bio}^{\circ}$ es la energía de formación de la biomasa a la temperatura estándar.

La determinación del poder calorífico superior se realizó con la relación seleccionada por CHANNIWALA & PARIKH³⁶ que está dada por la ecuación (47), esta ecuación presenta un error del 1,45%.

$$HHV_d = 0,3491 * fm_C + 1,1783 * fm_H - 0,0151 * fm_N - 0,0211 * fm_{ash} \quad (65)$$

$$LHV = HHV - (w_i * h_{fg\ w}) \quad (66)$$

$$LHV_{mol\ bm\ bs} = \frac{LHV}{PM_{H_2O}} \quad (67)$$

Para la obtención del poder calorífico del gas producto se determinó por medio de la norma ASTM D3588-98, mostrada a continuación:

$$LHV_{gas} = 12,07935 * y_{d\ H_2} + 11,94149 * y_{d\ CO} + 37,631 * y_{d\ CH_4} \quad (68)$$

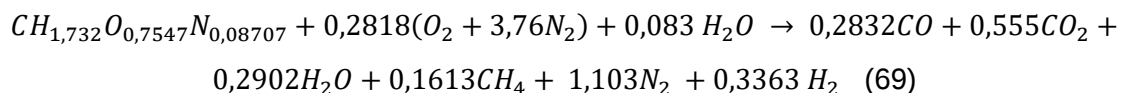
³⁶ CHANNIWALA, S; PARIKH, P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels [en línea]. EN: Fuel, Mayo 2002 vol.81. p. 1051-1063. [consultado el 20 de agosto]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236101001314>

8.1 RESULTADOS

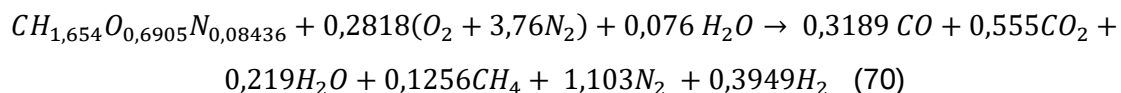
Al desarrollar el sistema de ecuaciones anteriormente descrito se pudo obtener una serie de datos aplicables para generar varias soluciones del posible comportamiento del gas obtenido al trabajar y tratar los residuos orgánicos alimenticios dependiendo del valor de temperatura utilizada.

Como ejemplo puntual se tiene el resultado de la siguiente expresión para una temperatura de 800K, en las ecuaciones (69) y (70) se evidencian los resultados de las pruebas de la muestra seca y la torrefactada, respectivamente, en donde se ve la reducción de la molécula H_2O , demostrando que una de las ventajas que obtiene con la torrefacción es disminuir la higroscopia, también se pudo corroborar con el aumento de hidrógeno (H_2), que una de las formas de obtención del mismo es el proceso de gasificación de biomasa.³⁷

Para las pruebas sin torrefactar se obtuvo la siguiente ecuación:



Para la muestra que fue torrefactada se obtuvo la siguiente expresión:



³⁷ COT, Sergio. influencia de las condiciones de pretratamiento en la gasificación eficiente de biomasa vegetal para la producción de energía Sostenible [en línea]. Trabajo de investigación Máster en Química Sostenible, Valencia Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología Química, 2017. p. 60-69. [Consultado el 29 de agosto de 2019]. Disponible en <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86232/Cot%20-%20Gasificaci%C3%B3n%20eficiente%20de%20biomasa%20vegetal%20de%20origen%20industrial%20y%20forestal.%20Influencia%20de%20la....pdf?sequence=1>

Anteriormente en los datos presentados se evidencia como el proceso de torrefacción cumple con el objetivo de mejorar las condiciones térmicas de la biomasa y establecer una diferencia en hacer o no el proceso de torrefacción para llevar las muestras a un posible proceso de gasificación.

9 CONCLUSIONES

- Al aumentar la temperatura en el proceso de torrefacción se adquiere un mayor alcance de aprovechamiento de energía de los residuos orgánicos alimenticios, corroborando que a mayor temperatura mayor reducción de masa, logrando menor contenido de humedad y un mayor valor de poder calorífico, para esta investigación la energía seleccionada fue la del proceso de torrefacción a 275°C por un tiempo de 30 min.
- A través de las pruebas de termogravimetría se pudo evidenciar que para la descomposición térmica de los residuos orgánicos alimenticios no es necesario un valor alto de temperatura y que su velocidad de descomposición varia de la atmosfera a la cual se realice el tratamiento térmico, teniendo diferencias en el proceso de descomposición, en atmosfera de nitrógeno la velocidad de descomposición es menor en comparación con la hecha en atmosfera de aire sintético, trabajando a la misma velocidad de calentamiento.
- El modelo matemático isoconversional del comportamiento de las pruebas no isotérmicas torrefactadas fue exitoso según lo indica el valor de desviación estándar hallado, estando dentro del rango admitido $\leq 5\%$. Las pruebas realizadas dieron como resultado una energía de activación dentro de los valores ya establecidos para procesos de descomposición térmica de residuos orgánicos.
- Los modelos empleados en la masa seca sin torrefactar se observaron que para cada velocidad estudiada fue necesario tener un valor de factor pre exponencial diferente y así lograr una similitud entre los valores teóricos y

experimentales. Siendo la prueba de 225°C la que más se ajustó en los dos modelos.

- Por medio del modelo de reacciones paralelas se obtienen de forma óptima el comportamiento de la biomasa, ya que permite un modelamiento por ajuste que asemeja de forma más precisa los datos teóricos a los experimentales.
- Por medio del análisis hecho en el proceso del comportamiento de la biomasa en la torrefacción en cada uno de los tiempos, se modeló una línea de tendencia para así poder tener cualquier valor que sea necesario dentro de los rangos trabajados ampliando los aportes de la presente investigación.
- Se puede asegurar que el proceso de secado de las muestras no necesariamente tiene que llevarse a cabalidad con las 18 horas expuestas en la norma, ya que se pudo notar que las diferencia en la extracción de humedad varia de forma insignificante.
- El objetivo principal de la gasificación, en términos generales es la obtención del gas de síntesis (hidrogeno/gas de síntesis) al realizar el proceso de gasificación a la biomasa en investigación, esta se puede considerar portadora del gas de síntesis, porque como se evidencio en los resultados expuestos, estas moléculas aumentaron en el análisis torrefactado, siendo este proceso una ventaja aplicada a la biomasa para fines energéticos.
- Para la obtención de gas las muestras de biomasa con proceso de torrefacción serán de menor cantidad en comparación con la muestras sin el proceso combinado (torrefacción-gasificación).

- Dependiendo de la composición elemental de la biomasa se puede llegar a obtener productos más óptimos y satisfactorios de gas, según sea la necesidad de aplicación.

10 RECOMENDACIONES

- Agregar o quitar algunos de los residuos orgánicos alimenticios, buscando un mayor rendimiento energético de otras combinaciones.
- No se recomienda realizar pruebas isotérmicas de termogavimetría en temperaturas mayores de 800 (°C) a muestras torrefactadas, ya que dependiendo el compuesto de la biomasa, esta podría convertirse en una portadora de gas (absorbe el gas).
- Sería óptimo realizar pruebas de termogavimetría a diferentes temperaturas a las pruebas no isotérmicas, para así complementar los resultados expuestos en esta investigación.

BIBLIOGRAFIA

ABAUNZA GOMEZ,, Álvaro José y GARCÍA GAMBOA, Kevin Fernando. Modelado matemático de un gasificador de cisco de café de lecho fijo Downdraf. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2019. p 99-104.

ALBA CRUZ, Oscar Fabián y CAÑÓN ACOSTA, Manuel Alexander. Evaluación del potencial, como biocombustible, de los residuos orgánicos alimentarios secos obtenidos en el secador solar de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas [en línea]. Tesis de Grado Ingeniería Mecánica. Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. 2017. 68 p. [consultado en 11 de julio de 2019]. Disponible en <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13409>.

ARAUZO, J et al. Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. En: Boletín del Grupo Español del Carbón [en línea]. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, septiembre, 2014, nro. 33. 2 p. [Consultado: 30 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5111506>.

ASTM D5373-16. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke. [En línea]. (Última revisión 2016). [Consultada: 18 de enero de 2019]. Disponible en internet: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D5373+16#fn00001.

ASTM E1755-01. Método de prueba estándar para cenizas en biomasa. [En línea]. (Aprobada en 2015). [Consultada: 15 de octubre de 2018]. Disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01(2015)).

ASTM E1756 – 08. Método de prueba estándar para la determinación de sólidos totales en biomasa. [En línea]. (Aprobada 2015). [Consultada: 15 de octubre de 2018] disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08(2015)).

ASTM E872-82. Método de prueba estándar para materia volátil en el análisis de combustible de madera particulada. [En línea]. (Aprobada en 2013). [Consultada: 15 de octubre de 2018]. Disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82\(2013\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82(2013)).

BALLESTEROS IBARRA, Julián Camilo y ORDOÑEZ RUEDA, Yesid Javier. Biomasa para el aprovechamiento energético una revisión de la caracterización y los modelos por descomposición termoquímica. Informe del grupo de investigación GIEMA. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. 2017. Serie de informes técnicos: A008. [Consultado: 29 de enero de 2019]. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Yesid_Rueda-Ordenez/publication/324223970_Biomasa_para_el_aprovechamiento_energetico_Una_revision_de_la_caracterizacion_y_los_modelos_por_descomposicion_termoquimica/links/5ac62fc6a6fdcc051db05568/Biomasa-para-el-aprovechamiento-energetico-Una-revision-de-la-caracterizacion-y-los-modelos-por-descomposicion-termoquimica.pdf.

BASU. Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, “Practical Design and Theory”. 1 ed. Kidlington.: Elsevier, 2010. 364p. [Consultado el 12 de junio de 2019]. Disponible en <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=QSypbUSdkikC&oi=fnd&pg=PP>

[1&dq=BASU.+Prabir.+Biomass+Gasification+and+Pyrolysis,+%E2%80%9CPractical+Desing+and+Theory%E2%80%9D.+1+ed.+Kidlinggton.:+Elsevier,+2010.+364p.+ISBN+978-0-12-374988-8&ots=Vq0n2bGsfe&sig=SpZ8C1Vvnqf77FG50dpkpBqdtPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236101001314)

CHANNIWALA, S; PARIKH, P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels [en línea]. EN: Fuel, Mayo 2002 vol.81. p. 1051-1063. [Consultado el 20 de agosto]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236101001314>.

CENGEL, Yunes; BOLES, Michael. Termodinámica, reacciones químicas. 7 ed. México: MCGraw-Hill. 2012. 784p.

COT CANTALOSELLA, Sergio. Influencia de las condiciones de pre tratamiento en la gasificación eficiente de biomasa vegetal para la producción de energía Sostenible [en línea]. Trabajo de investigación Máster en Química Sostenible, Valencia Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología Química, 2017. p. 60-69. [Consultado el 29 de agosto de 2019]. Disponible en <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86232/Cot%20-%20Gasificaci%C3%B3n%20eficiente%20de%20biomasa%20vegetal%20de%20origen%20industrial%20y%20forestal.%20Influencia%20de%20la....pdf?sequence=1>

CUTIÑO, Enma; MEDINA, Margarita y ORTEGA, Giselle. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales [en línea]. En: RTQ. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, mayo- agosto de 2011. vol.31,nro.2. p.3-4. [Consultado: 20 mayo de 2019]. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000200005

DUQUE PAEZ, Santiago y SUARES ACELAS, Ivan. Evaluación de una unidad piloto a escala laboratorio de vapor reformado usando bajas concentraciones de agua. Trabajo de investigación Ingeniería Mecánica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica ,2019. p 31-33.

ESTRADA, Carlos Augusto y MENESES ZAPATA, Alberto. Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. En: Scientia et technica. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira,2004. vol 2. nro. 25.p .2-3. [Consultado:10 junio de 2019]. Disponible en <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7229/4237>.

GARCIA RAMIREZ, Laura Andrea y LEÓN SUÁREZ, Laura Daniela. Análisis energético de un sistema de gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis [en línea]. Trabajo de investigación Ingeniería Química. Bogotá. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Química,2018 .p 20-40. [Consultado: 20 de junio de 2019]. Disponible en <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6943>.

GIRALDO, Natalia y MONTROYA, Natalia. Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido [en línea]. Tesis de Grado para Optar por el Título de Ingeniera Ambiental. Medellín. Universidad de Medellín. Facultad de Ingeniería 2016. [Consultado: 30 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/2167>.

HIRUBILIA BUSCADOR EN LINEA: Energía De Activación. Ecuación De Arrhenius. Catálisis [en línea]. Hirueus. [Consultado: 29 de septiembre de 2019].

Disponible en <https://www.hiru.eus/es/quimica/energia-de-activacion-ecuacion-de-arrhenius-catalisis>.

INSTITUTO NACIONAL DEL CANCER [Sitio Web]. Estados Unidos. Sustancias químicas en la carne cocinada a altas temperaturas y el riesgo de cáncer. [Consultado: 20 de Agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/dieta/hoja-informativa-carne-cocinada>

LOPES, Fernanda Cristina Rezende; TANNOUS, Katia; RUEDA-ORDÓÑEZ, Yesid Javier. Combustion reaction kinetics of guarana seed residue applying isoconversional methods and consecutive reaction scheme. En: Bioresource technology. Campinas : Universidad de Campinas, 2016, vol. 219, p. 392-402. [Consultado: 10 de junio 2019]. Disponible en <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0960852416310781?token=9D5B0F0869A57C558E4615D15664E2D909A42333D759C69EAFBCA0FA0700D2B61D24EC068CBB6D4AB7DD8C5E2DA5FB79>.

MARTIN-LARA, M.A; BLÁZQUEZ, G; ZAMORA, M.C; CALERO, M. Kinetic modelling of torrefaction of olive tree pruning [en línea]. En: Applied Thermal Engineering. Ferrero, 2017, Vol. 113. P. 1410-1418. [Consultado: 15 de Julio 2019]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431116334974>.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies [en línea]. En: Bioresource Technology. Mayo 2002. vol. 83. p. 55-63. [Consultado: 15 de febrero de 2019]. Disponible en internet [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00120-1).

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Pérdida y desperdicio de alimentos [en línea]. [Consultado: 7 de octubre de 2019]. Disponible en <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/es/>

PALACIOS, Carolina. Estudio de la viabilidad de una empresa gestora de terrenos en el municipio de Terrassa. Máster universitario en ingeniería de organización. Barcelona [en línea]. Universitat Politècnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2014. 38 p. [Consultado el 20 de mayo de 2019]. Disponible en <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/20973>

PARIKH, Jigsha; CHANNIWALA, S.A; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials [en línea]. En: FUEL. 2017. Vol. 86. p. 1710-1719. [Consultado: 24 de octubre de 2018]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/244067708_A_correlation_for_calculating_elemental_composition_from_proximate_analysis_of_biomass_materials.

REDACCIÓN ECONOMÍA. Plan de Ordenamiento Agropecuario se inicia con el arroz [en línea]. En: El Espectador. Bogotá, Marzo 14 de 2019. [Consultado el 18 de junio de 2019]. Disponible en <https://www.elespectador.com/economia/plan-de-ordenamiento-agropecuario-se-inicia-con-el-arroz-articulo-845055>

REDACCIÓN SALUD. Colombia produce pero no consume [en línea]. En: El Espectador. Bogotá, Octubre 20 de 2013. [Consultado el 18 de febrero de 2019]. Disponible en <https://www.dinero.com/pais/articulo/consumo-frutas-verduras-colombia/186472>

REZANDE, Fernanda; TANNOUS, Katia; RUEDA-ORDOÑEZ, Yesid. Combustion reaction kinetics of guarana seed residue applying isoconversional methods and consecutive reaction scheme [en línea]. En: Bioresource Technology. Campinas:

Universidad de Campinas, Noviembre 2016. vol. 219. p. 392-402. [Consultado 2 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852416310781>

RINCON, Sonia; GOMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial [en línea]. Bogotá: universidad nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica.2011. p.27. [consultado 30 de marzo de 2019]. Disponible en https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=a2Th1GjH0gEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=26.%09RINCON,+Sonia%3B+GOMEZ,+Alexander%3B+KLOSE,+Wolfgang.+&ots=25_CvpwYM4&sig=e0Gvc98acFRJlv-Z1Dbc9e-GiB8&redir_esc=y#v=onepage&q=26.%09RINCON%2C%20Sonia%3B%20GOMEZ%2C%20Alexander%3B%20KLOSE%2C%20Wolfgang.&f=false

RODRÍGUEZ, Ellen y VILLEGAS, Ernesto. Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. En: Métodos y materiales [en línea] .San José: Universidad de Costa Rica, junio-julio, 2012, nro. 2, 26p. [Consultado 30 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/13470/13366>

RUEDA ORDOÑEZ, Yesid y TANNOUS, Katia. Análisis cinético de la descomposición térmica de biomásas aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes [en línea]. Bucaramanga: Revista UIS Ingenierías, julio-diciembre de 2017. vol. 16. nro. 2. p. 119-128. [Consultado 3 de septiembre 2019]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/6283>

RUEDA, Yesid; TANNOUS, Katia. Isoconversional kinetic study of the thermal decomposition of sugarcane straw for thermal conversion processes [en línea]. En: Bioresource Technology. Campinas: Universidad de Campinas, noviembre

2015,vol.196.p.136-144. [Consultado: 3 de febrero de 2019]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241501024X>

SALDARRIAGA, Juan. Avances en el modelo de la combustión de biomasa en sputed bed cónico [en línea]. Tesis Doctoral. Leioa. Universidad el País Vasco. Facultad de Ciencia y tecnología. Departamento de Ingeniería Química, 2015. p. 10-36. [Consultado el 20 de mayo de 2019]. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/0c69/f08cebfd51995cb04e52b23c4798e1b88cfa.pdf>

SAVAL, S. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. En: Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A.C. [En línea]. México D.F, 2012. nro.2. 15 p. [Consultado: 30 de septiembre de 2019]. Disponible en https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista_2012_V16_n2.pdf#page=14

VYAZOVKIN, Sergey; WIGHT, Charles A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and no isothermal data (1999). En: Acta thermichica. 1999. Vol., 340-341, P. 53-68. [Consultado: 18 de enero de 2019]. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00253-1).

VYAZOVKIN, Sergey, et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data [en línea]. En: Thermochimica acta, 2011. vol. 520. nro. 1-2. p. 1-19. [Consultado el 12 de septiembre de 2019]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040603111002152>

ANEXOS

Anexo A. Procedimiento termodinámico para la obtención del calor requerido en el proceso

Las ecuaciones del procedimiento para la obtención del calor requerido en el proceso fueron modeladas en el software EES. La formulación se muestra a continuación:

$$Q_c = \text{Humedad} \cdot C_{p_w} \cdot [T_{\text{sat}} - T_0] + [1 - \text{Humedad}] \cdot C_{p_B} \cdot [T_2 - T_1]$$

$$C_{p_w} = 4,18$$

$$C_{p_B} = 1,38$$

$$T_0 = 30$$

$$T_2 = 105$$

$$\text{Humedad} = 0,38$$

$$T_{\text{sat}} = T_{\text{sat}} [\text{'Water'} ; P=90,6065]$$

$$Q_{\text{evap}} = \text{Humedad} \cdot h_{fg}$$

$$h_{fg} = 2257,5$$

$$Q_{\text{Torref}} = C_{p_{B1}} \cdot [T_{\text{Torref}} - T_{2t}] + Q_{\text{Reacc}}$$

$$T_{2t} = 275$$

$$C_{p_{B1}} = 1,449$$

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{Torref}} + Q_{\text{evap}} + Q_c$$

$$Q_{\text{Reacc}} = 2,839 \cdot T_{\text{Torref}} - 430,58$$

Anexo B. Procedimiento del modelo termodinámico de la gasificación

Para llevar a cabo el modelamiento de las ecuaciones del modelo termodinámico de la gasificación se utilizó como herramienta el software EES, a continuación, se presenta el procedimiento y los resultados a una temperatura de 800°C.

File: C:\Users\ANGIE\Desktop\Nuevo\Libro\Modelo Termodinámico de la Gasificación
44: #4402: EASY ENGINEERING, <https://www.youtube.com/channel/UCv...>

"Modelo de gasificación"

```
{1} T_amb=25 [°C]
{2} To=298,15[K]
{3} Po= 101,325[KPa]
{4} Hum_B=32 [%] "Humedad de la biomasa"
{5} Phi=0,2 [Radio equivalente]
{6} C=44,40[%]
{7} H=6,41[%]
{8} N=4,51[%]
{9} O=44,68[%]
```

"Fracción molar de los elementos"

```
{10} Fm_C=44,40{C}/100
{11} Fm_H=6,41{H}/100
{12} Fm_N=4,51{N}/100
{13} Fm_O=44,68{O}/100
```

```
{Fm_C=60,11{C}/100
Fm_H=5,56{H}/100
Fm_N=0{N}/100
Fm_O=33,51{O}/100}
```

```
{14} Fm_total=Fm_C+Fm_H+Fm_N+Fm_O
```

"Humedad de la biomasa"

```
{28} B_H={Hum_B}32/100
{29} B_S=B_H/(1-B_H) {Kg_h2O/Kg biomasa seca}
```

```
{30} m_w=B_S
{31} w=m_w*PM_equiv/18
```

"Estimación aire teórico"

```
{31} Air_T=1+x/4-y/2+w/2 {Kmol O2_Teo / Kmolel comb ??}
{32} AC_t=(1+3,16)*Air_T {Relación aire/combustible molar}
```

"Moles de cada elemento en 1kg de biomasa sin ceniza"

```
{15} n_C=Fm_C/12
{16} n_H=Fm_H/1
{17} n_N=Fm_N/14
{18} n_O=Fm_O/16
{19} n_Total=n_C+n_H+n_N+n_O
```

"Fracción molar de cada elemento en la biomasa"

```
{20} Fn_C=n_C/n_Total
{21} Fn_H=n_H/n_Total
{22} Fn_N=n_N/n_Total
{23} Fn_O=n_O/n_Total
```

"Composición química equivalente de la biomasa CHxOyNz"

```
{24} x=n_H/n_C
{25} y=n_O/n_C
{26} z=n_N/n_C
```

"Peso molecular equivalente"

```
{27} PM_equiv=1*12+x*1+y*16+z*14
```

"Humedad de la biomasa"

```
{33} molO_2=phi*Air_T
{34} m=molO_2
```

"Balance de masa para cada elemento"

```
{35} "Para el N" z+2*m*3,76=2*n_N2
{36} "Para el C" 1=n_CO2+n_CO+n_CH4
{37} "Para el H" x+2*w=2*n_H2O+2*n_H2+4*n_CH4
{38} "Para el O" y+2*m+w=2*n_CO2+n_H2O+n_CO
{39} "Kmoles totales sin gas" n_Tt=n_CO2+n_H2O+n_N2+n_CO+n_H2+n_CH4
```

"Lo que necesito hallar"

```
{40} x_CO2=n_CO2/n_Tt
{41} x_H2O=n_H2O/n_Tt
{42} x_N2=n_N2/n_Tt
{43} x_CO=n_CO/n_Tt
{44} x_H2=n_H2/n_Tt
{45} x_CH4=n_CH4/n_Tt
{46} x_Tt=x_CO2+x_H2O+x_N2+x_CO+x_H2+x_CH4
```

"Fracciones molares en base seca"

```
{47} y_CO2=n_CO2/n_Ts
{48} y_CO=n_CO/n_Ts
{49} y_H2=n_H2/n_Ts
{50} y_CH4=n_CH4/n_Ts
{51} y_N2=n_N2/n_Ts
```

```
{52} n_Ts=n_CO2+n_N2+n_CO+n_H2+n_CH4
```

```

"Poder calorífico en base seca"
{53} Hiv=(12,07935*y_H2)+(11,941492*y_CO)+(37,631*y_CH4)

"Fracciones molares en base seca y libre de nitrógeno"
{54} z_CO2=n_CO2/n_Tz
{55} z_CO=n_CO/n_Tz
{56} z_H2=n_H2/n_Tz
{57} z_CH4=n_CH4/n_Tz

{58} n_Tz=n_CO2+n_CO+n_CH4+n_H2

{59} R=8,314 [KJ/Kmol K] {Kte universal}

{60} Kp_M=(n_Tt*n_CH4/(n_H2**2))
{61} {(Kp_M)=exp(-DELTAgo_M/(R*T))}
{62} {Kp_M=0,067}
{63} DELTAgo_M=(go_CH4)-(vbw_H2*go_H2)
{64} vbw_H2=2 { por qué}

"Energía libre de gibbs en equilibrio"
{65} DELTAgo_wg=(go_H2+go_CO2)-(go_CO+go_H2O)
{66} (Kp_wg)=exp(-DELTAgo_wg/(R*T))
{67} {Kp_wg=0,08}
{68} Kp_wg=(n_CO2*n_H2)/(n_CO*n_H2O)

{ Constante de equilibrio. Combinacion Reacciones de Boudouan

```

{Entalpia estándar de formacion de la biomasa hfo, Entropia estándar de formac

```

{69} go_H2=hfo_H2+(h_H2-ho_H2)-T*(sfo_H2+(s_H2-so_H2))
{70} go_CO=hfo_CO+(h_CO-ho_CO)-T*(sfo_CO+(s_CO-so_CO))
{71} go_CO2=hfo_CO2+(h_CO2-ho_CO2)-T*(sfo_CO2+(s_CO2-so_CO2))
{72} go_H2O=hfo_H2O+(h_H2O-ho_H2O)-T*(sfo_H2O+(s_H2O-so_H2O))
{73} go_CH4=hfo_CH4+(h_CH4-ho_CH4)-T*(sfo_CH4+(s_CH4-so_CH4))

```

{ANALISIS DE SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA }

{energias libres de Gibbs de formación de los compuestos To=298K, Po=101.3:

```

{74} gfo_H2 = 0 [kJ/kmol]
{75} gfo_CO = -137160[kJ/kmol]
{76} gfo_CO2 = -394390[kJ/kmol]
{77} gfo_H2O = -228600[kJ/kmol]
{78} gfo_CH4 = -50500[kJ/kmol]
{79} gfo_H2s = -33830[kJ/kmol]
{80} gfo_N2 = 0[kJ/kmol]
{81} gfo_O2 = 0[kJ/kmol]

```

{entropías de formación de los compuestos sfo }

```

{82} sfo_H2 = 0 {(hfo_H2 - gfo_H2)/298.15}
{83} sfo_CO = (hfo_CO - gfo_CO)/298.15
{84} sfo_CO2 = (ho_CO2-gfo_CO2)/298.15
{85} sfo_H2O = (ho_H2O-gfo_H2O)/298.15
{86} sfo_CH4 = (hfo_CH4-gfo_CH4)/298.15
{87} sfo_H2s = (hfo_H2s-gfo_H2s)/298.15
{88} sfo_N2 = 0 {(hfo_N2 - gfo_N2)/298.15}

```

```

{88} sfo_N2 = 0 {(hfo_N2 - gfo_N2)/298.15}
{89} sfo_O2 = 0 {(hfo_O2 - gfo_O2)/298.15}

```

{entropias estandar en el estado de referencia (To=298.15K,Po=101.325KPa)}

```

{90} so_H2 = entropy(H2;T=To,P=101,325)
{91} so_CO = entropy(CO;T=To,P=101,325)
{92} so_CO2 = entropy(CO2;T=To,P=101,325)
{93} so_H2O = entropy(H2O;T=To,P=101,325)
{94} so_CH4 = entropy(CH4;T=To,P=101,325)
{95} so_N2 = entropy(N2;T=To,P=101,325)
{96} so_O2 = entropy(O2;T=To,P=101,325)

```

{Entropia estandar en el estado de salida del Syn (T,Po=101.325kPa,)}

```

{97} s_H2 = Entropy(H2,T=T,P=101,325)
{98} s_CO = Entropy(CO;T=T,P=101,325)
{99} s_CO2 = Entropy(CO2;T=T,P=101,325)
{100} s_H2O = Entropy(H2O;T=T,P=101,325)
{101} s_CH4 = Entropy(CH4;T=T,P=101,325)
{102} s_N2 = Entropy(N2;T=T,P=101,325)
{103} s_O2 = Entropy(O2;T=T,P=101,325)

```

{DATOS TERMODINAMICOS DE LAS ESPECIES EN EL SYNGAS}

{entalpias de formacion de cada uno de las especies en los Productos asumidos c

```

{104} hfo_H2 = enthalpy_formation(H2)
{105} hfo_CO = enthalpy_formation(CO)
{106} hfo_CO2 = enthalpy_formation(CO2)

```

```

{107} hfo_H2O = enthalpy_formation(H2O)
{108} hfo_CH4 = enthalpy_formation(CH4)
{109} hfo_H2s = enthalpy_formation(H2S)
{110} hfo_N2 = {enthalpy_formation(N2)} 0
{111} hfo_O2 = {enthalpy_formation(O2)} 0

```

{entalpia estandar molar h° en la temperatura de referencia T_o ;
se supone igual a la entalpia estandar de formación h°_f }

```

{112} ho_H2 = enthalpy(H2;T=To)
{113} ho_CO = enthalpy(CO;T=To)
{114} ho_CO2 = enthalpy(CO2;T=To)
{115} ho_H2O = enthalpy(H2O;T=To)
{116} ho_CH4 = enthalpy(CH4;T=To)
{117} ho_H2s = enthalpy(H2s;T=To)
{118} ho_N2 = enthalpy(N2;T=To)
{119} ho_O2 = enthalpy(O2;T=To)

```

{Valor de la entalpia molar de los gases que componen el Syngas}

```

{120} h_H2 = enthalpy(H2;T=T)
{121} h_CO = enthalpy(CO;T=T)
{122} h_CO2 = enthalpy(CO2;T=T)
{123} h_H2O = enthalpy(H2O;T=T)
{124} h_CH4 = enthalpy(CH4;T=T)
{125} h_H2s = enthalpy(H2S;T=T)
{126} h_N2 = enthalpy(N2;T=T)

```

```

{127} T=800

```

"Propiedades energéticas"

"Poder calorífico inferior en base seca, expresión empírica"

```

{128} HHV=(0,3491*Fm_C+1,1783*Fm_H-0,1034*Fm_O-0,0151*Fm_N)*100*1000 [KJ/Kg]

```

```

{129} DELTAh_vap = enthalpy_vaporization(Water;T=To){kJ/kmol de agua} {44000} {TABLAS=?}

```

```

{130} hfg_w = DELTAh_vap/{molamasa(Water)} 18

```

```

{131} LHV = HHV - 9*Fm_H * hfg_w { poder calorifico inferior gravimétrico kJ/kg} {QUE=?}

```

```

{132} LHVk_BS = LHV { poder calorifico inferior gravimétrico en kJ/kg en base seca kJ/kg}

```

```

{133} LHVmol_BS = LHVk_BS*PM_equiv {Poder calorifico inferior molar de la biomasa en base seca} {en kJ/kmol comb equivalente}

```

```

{134} LHVmol = LHV*PM_equiv

```

```

{135} hfo_biom = LHVmol_BS + (1*hfo_CO2 + x/2 * hfo_H2O)

```

```

{136} HR= hfo_biom+m*hfo_O2+m*3,76*hfo_N2+w*hfo_H2 {Entalpia total de los reactivos @ To y Po}

```

```

{137} HP = n_CO2*h_CO2 + n_H2O*h_H2O + n_N2 *h_N2 + n_CO *h_CO+ n_H2 *h_H2 + n_CH4 *h_CH4

```

```

{138} HR = HP

```

Anexo C. Modelo Isoconvensional de las pruebas no isotérmicas torrefactadas

- **Normalización de los datos obtenidos en la TGA y obtención de la energía inicial de activación promedio.**

Inicialmente se tienen los datos obtenidos de las pruebas de termogravimetría:

	A	B	C	D
1	Time	Temperature	Weight	Weight
2	min	Â°C	mg	%
3	0	34,808	9,091	99,0005
4	1,67E-03	34,809	9,091	99
5	3,33E-03	34,811	9,091	98,9994
6	5,00E-03	34,812	9,091	98,9988
7	6,67E-03	34,813	9,091	98,9983
8	8,33E-03	34,814	9,091	98,9977
9	0,01	34,815	9,091	98,9971
10	⋮	⋮	⋮	⋮
11	114,205	797,547	1,873	20,3928

Se seleccionaron los datos después del tiempo de secado de la muestra, que fue aproximadamente a una temperatura de 107°C y se procedió a realizar la normalización de la masa.

	L	M	N	O
1	Time	T	Peso	DTG
2	s	°C	mg	
3	4044,9	106,996	8,617	0
4	4050	107,001	8,617	0
5	4054,998	107,027	8,617	0
6	4059,9	107,137	8,617	0
7	4065	107,394	8,617	0
8	4069,998	107,84	8,617	0
9	4074,9	108,549	8,617	9,80E-05
10	4080	109,567	8,618	9,80E-05
11	⋮	⋮	⋮	⋮
565	6852,3	797,547	1,873	-4,17E-04

	Q	R	S	T
1	W	dw/dt	α	d α /dt
2	$\frac{N3}{N3}$	$\frac{O3}{N3}$	$\frac{(Q3-Q3)}{(Q3-Q565)}$	$(-R3)*(1/(Q3-Q565))$
3	1	0	0	0
4	1	0	0	0
5	1	0	0	0
6	1	0	0	0
7	1	0	0	0
8	1	0	0	0
9	1	1,138E-05	0	-1,13774E-05
10	1,000116	1,138E-05	-0,00011605	-1,13774E-05
11	:	:	:	:
565	0,217361	-4,835E-05	0,782638969	4,83541E-05

Se procedió acotar el rango de los valores de la masa normalizada eligiendo así un rango de trabajo de 0,96 a 0,5 aproximadamente, que es donde se presenta la descomposición que nos interesa de la biomasa (combustión).

2	Temp°C	W	dw/dt	α	d α /dt
3	272,56	0,96135546	-0,00047464	0,03864454	0,00047464
4	273,833	0,95880237	-0,00051758	0,04119763	0,00051758
5	275,078	0,95613323	-0,00055124	0,04386677	0,00055124
6	276,297	0,95334803	-0,00058025	0,04665197	0,00058025
7	277,566	0,95033074	-0,00062087	0,04966926	0,00062087
8	278,81	0,94708135	-0,00068005	0,05291865	0,00068005
9	280,031	0,94359986	-0,00074156	0,05640014	0,00074156
10	281,304	0,93965417	-0,00079262	0,06034583	0,00079262
11	282,55	0,93559243	-0,00084484	0,06440757	0,00084484
12	283,766	0,9312986	-0,00091563	0,0687014	0,00091563
13	285,035	0,92642451	-0,00100035	0,07357549	0,00100035
14	286,285	0,92120227	-0,00107926	0,07879773	0,00107926
53	:	:	:	:	:
54	334,842	0,50005802	-0,00150052	0,49994198	0,00150052

Una vez seleccionados los datos se vuelve hacer el cálculo de la conversión, la tasa de cambio de la conversión, la temperatura en kelvin y la inversa de la temperatura 1/K, como lo señala la tabla E:

	Q	R	S	T	U	V	W
1	Temp°C	W	dw/dt	α	$d\alpha/dt$	T(K)	1/T
2				$(\$R\$3-\$R3)/(\$R\$3-\$R\$53)$	$(-S3)*(1/(\$R\$3-\$R\$53))$	273,15+Q3	1/V3
3	272,56	0,96135546	-0,00047464	0	0,001028931	545,71	0,001832475
4	273,833	0,95880237	-0,00051758	0,005534591	0,001122013	546,983	0,00182821
5	275,078	0,95613323	-0,00055124	0,011320755	0,001194969	548,228	0,001824059
6	276,297	0,95334803	-0,00058025	0,017358491	0,001257862	549,447	0,001820012
7	277,566	0,95033074	-0,00062087	0,023899371	0,001345912	550,716	0,001815818
8	278,81	0,94708135	-0,00068005	0,030943396	0,001474214	551,96	0,001811725
9	280,031	0,94359986	-0,00074156	0,038490566	0,001607547	553,181	0,001807727
10	281,304	0,93965417	-0,00079262	0,047044025	0,001718239	554,454	0,001803576
11	282,55	0,93559243	-0,00084484	0,055849057	0,001831447	555,7	0,001799532
12	283,766	0,9312986	-0,00091563	0,065157233	0,001984906	556,916	0,001795603
13	285,035	0,92642451	-0,00100035	0,07572327	0,002168553	558,185	0,001791521
14	286,285	0,92120227	-0,00107926	0,087044025	0,002339623	559,435	0,001787518
15	:	:	:	:	:	:	:
53	334,842	0,50005802	-0,00150052	1	0,00325283	607,992	0,001644758

A continuación, se seleccionaron los datos de conversión de la velocidad de 15 °C/min para realizar el modelamiento del comportamiento de la biomasa. Teniendo en cuenta de igual modo la tasa de conversión y temperaturas de las otras dos velocidades (10°C/min y 5°C/min).

N	O	P	Q	R
Conversion 15 °C/min				
Temp. °C	W	dW/dt	α	$d\alpha/dt$
277,566	0,95033074	-0,0006209	0	0,00156845
278,81	0,94708135	-0,0006801	0,00820874	0,00171797
280,031	0,94359986	-0,0007416	0,01700381	0,00187335
281,304	0,93965417	-0,0007926	0,02697156	0,00200235
282,55	0,93559243	-0,0008448	0,03723248	0,00213427
283,766	0,9312986	-0,0009156	0,04807974	0,0023131
285,035	0,92642451	-0,0010003	0,06039285	0,00252712
286,285	0,92120227	-0,0010793	0,07358546	0,00272647
287,509	0,91574794	-0,0011593	0,08736441	0,00292876
288,78	0,90959731	-0,0012417	0,10290237	0,00313691
290,024	0,90321458	-0,0013253	0,11902668	0,00334799
291,242	0,8964837	-0,0014263	0,13603049	0,00360305
292,51	0,88894047	-0,0015295	0,15508648	0,00386397
293,756	0,88104909	-0,0016177	0,17502199	0,00408678
:	:	:	:	:

Se buscó la temperatura en (°C) para cada valor de (α) de la velocidad de 15°C/min con la función BUSCAR en las velocidades de 5°C/min y 10°C/min.

B	C	D	E
	Temperatura (°C)		
α	5 °C/min	10 °C/min	15 °C/min
0	267,131	274,425	277,566
0,0082087	268,372	275,257	278,81
0,0170038	269,615	276,072	280,031
0,0269716	270,865	277,745	281,304
0,0372325	272,106	278,557	282,55
0,0480797	272,946	280,239	283,766
0,0603928	274,182	281,055	285,035
0,0735855	275,43	282,731	286,285
0,0873644	276,677	283,541	287,509
0,1029024	277,922	285,215	288,78
0,1190267	279,164	286,032	290,024
0,1360305	280,41	287,707	291,242
0,1550865	281,654	288,516	292,51
0,175022	282,897	290,193	293,756
0,1955438	283,725	291,011	294,979
⋮	⋮	⋮	⋮

Se hizo la conversión de grados °C a grados K de cada una de las temperaturas anteriores y se halló su inverso:

G	H	I	J	K	L	M
Temperatura (K)				1/T (1/K)		
5 °C/min	10 °C/min	15 °C/min		5 °C/min	10 °C/min	15 °C/min
540,281	547,575	550,716		0,00185089	0,00182623	0,00181582
541,522	548,407	551,96		0,00184665	0,00182346	0,00181173
542,765	549,222	553,181		0,00184242	0,00182076	0,00180773
544,015	550,895	554,454		0,00183818	0,00181523	0,00180358
545,256	551,707	555,7		0,001834	0,00181256	0,00179953
546,096	553,389	556,916		0,00183118	0,00180705	0,0017956
547,332	554,205	558,185		0,00182704	0,00180439	0,00179152
548,58	555,881	559,435		0,00182289	0,00179895	0,00178752
549,827	556,691	560,659		0,00181875	0,00179633	0,00178362
551,072	558,365	561,93		0,00181464	0,00179094	0,00177958
552,314	559,182	563,174		0,00181056	0,00178833	0,00177565
553,56	560,857	564,392		0,00180649	0,00178299	0,00177182
554,804	561,666	565,66		0,00180244	0,00178042	0,00176785
556,047	563,343	566,906		0,00179841	0,00177512	0,00176396
556,875	564,161	568,129		0,00179574	0,00177254	0,00176016
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Se hizo la búsqueda de las tasas de conversión para cada una de las velocidades con la función BUSCAR y se hizo el cálculo del logaritmo natural de la tasa.

O	P	Q	R	S	T	U
da/dt (1/K)				LN(da/dt) (1/K)		
5 °C/min	10 °C/min	15 °C/min		5 °C/min	10 °C/min	15 °C/min
0,00047579	0,00109091	0,00156845		-7,6505326	-6,8207439	-6,4576642
0,00053177	0,0011405	0,00171797		-7,539307	-6,7762921	-6,3666112
0,00061573	0,00118457	0,00187335		-7,3927035	-6,7383729	-6,2800265
0,0006717	0,00130854	0,00200235		-7,3056921	-6,6388433	-6,2134361
0,00075287	0,00137466	0,00213427		-7,1916197	-6,589552	-6,1496299
0,00079205	0,00153168	0,0023131		-7,1408841	-6,4813898	-6,0691646
0,00084803	0,0015978	0,00252712		-7,0725982	-6,43913	-5,9806757
0,000904	0,00178237	0,00272647		-7,0086787	-6,3298118	-5,9047464
0,00099076	0,00187052	0,00292876		-6,9170341	-6,281537	-5,8331762
0,00107473	0,00206061	0,00313691		-6,8356885	-6,1847551	-5,764517
0,00115869	0,00217355	0,00334799		-6,7604651	-6,1313918	-5,6993946
0,00121467	0,00236639	0,00360305		-6,7132865	-6,0463892	-5,6259749
0,00132942	0,00250413	0,00386397		-6,6230162	-5,989813	-5,5560603
0,00144137	0,00272727	0,00408678		-6,5421641	-5,9044532	-5,4999984
0,00147215	0,00283471	0,00433597		-6,5210298	-5,8658154	-5,4408095
;	;	;		;	;	;
0,0015813	0,00306061	0,0045881		-6,4495053	-5,7891423	-5,3847899

Seguidamente por medio de la función pendiente aplicado al valor del logaritmo natural de la tasa y multiplicándolo por la constante de los gases (8,314 J/molK) (=PENDIENTE (S3:U3;K3:M3)*-8,314) obtenemos un valor de energía de activación para cada punto. Hallando así un valor promedio (=PROMEDIO (W7:W40)) con estos datos de la energía de activación promedio del proceso (256,268066 KJ/Kmol).

W	X	Y
		PROMEDIO(W7:W40)
Ea (kJ/kmol)	Ea (J/kmol)	E_prom
282250,367	282,250367	253088,780
278411,909	278,411909	
265086,268	265,086268	
259479,41	259,47941	
249552,278	249,552278	
246853,927	246,853927	
252910,702	252,910702	
255845,988	255,845988	
254057,613	254,057613	
250078,859	250,078859	
250686,709	250,686709	
256905,286	256,905286	
254472,698	254,472698	
247881,011	247,881011	
250222,272	250,222272	
:	:	

- Solución integral de $(d\alpha/f(\alpha))$ y hallazgo del factor pre exponencial (A)

Se desarrollaron los modelos señalados en la teoría, sustituyendo el valor de α correspondiente en cada función descrita por $g(\alpha)$.

	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX
1							
2	A3	A4	F1	D1	D2	D3	D4
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0,2020017	0,3013119	0,0082426	6,738E-05	3,378E-05	7,528E-06	7,514E-06
5	0,2578824	0,3618814	0,01715	0,0002891	0,0001454	3,249E-05	3,237E-05
6	0,3012612	0,4066375	0,027342	0,0007275	0,000367	8,231E-05	8,181E-05
7	0,3360303	0,4413507	0,0379433	0,0013863	0,0007019	0,000158	0,0001566
8	0,3666114	0,4711449	0,049274	0,0023117	0,0011748	0,0002654	0,0002625
9	0,3964125	0,4995863	0,0622934	0,0036473	0,0018615	0,0004223	0,0004165
10	0,4243862	0,5258004	0,0764335	0,0054148	0,0027764	0,0006328	0,0006222
11	0,4504828	0,5498683	0,0914186	0,0076325	0,0039325	0,0009008	0,0008828
12	0,4770868	0,5740478	0,1085906	0,0105889	0,005486	0,0012638	0,0012338
13	:	:	:	:	:	:	:
14	0,5022934	0,5966479	0,1267279	0,0141674	0,0073827	0,0017109	0,0016637
15	0,5268255	0,6183723	0,1462178	0,0185043	0,0097028	0,002263	0,0021912

Para la eliminación del factor de frecuencia se desarrolló la ecuación, en la cual justo en $g(\alpha = 0,5)/g(\alpha = 0,5)$ tendremos un valor de 1 para todas las funciones.

	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ
1								
2	A2	A3	A4	F1	D1	D2	D3	D4
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,1085202	0,2275134	0,329424	0,0117766	0,0002659	0,0002169	0,0001739	0,0002015
5	0,1565347	0,2904515	0,3956446	0,0245031	0,0011411	0,0009333	0,0007504	0,000868
6	0,1976482	0,3393089	0,4445764	0,0390648	0,002871	0,0023563	0,0019009	0,0021938
7	0,2328336	0,3784691	0,4825283	0,0542115	0,005471	0,0045058	0,003648	0,0042
8	0,2653304	0,4129124	0,5151023	0,0704002	0,0091232	0,0075417	0,0061288	0,0070387
9	0,2983315	0,4464773	0,5461973	0,0890017	0,0143944	0,01195	0,0097532	0,011169
10	0,3304607	0,4779838	0,5748571	0,1092043	0,0213701	0,017823	0,0146148	0,0166842
11	0,361406	0,5073763	0,6011705	0,1306143	0,0301226	0,025245	0,0208034	0,0236709
12	0,3938892	0,5373403	0,6276059	0,1551487	0,0417901	0,0352176	0,0291862	0,0330841
13	0,4255143	0,5657303	0,6523146	0,1810624	0,0559128	0,0473938	0,039512	0,0446112
14	0,4570652	0,5933607	0,6760659	0,2089086	0,073029	0,0622872	0,0522619	0,0587553
15	0,4906875	0,6221141	0,7004909	0,2407743	0,0949228	0,0815332	0,0689116	0,0770974
16	0,5242988	0,6502084	0,7240848	0,2748893	0,1208949	0,1046217	0,089118	0,0991871
17	0,557566	0,6774296	0,7467034	0,3108798	0,1509076	0,1316207	0,1130394	0,1251251
18	0,5933644	0,7061241	0,7703015	0,3520814	0,188266	0,1656685	0,1436184	0,1579844
19	0,6289761	0,7341015	0,7930802	0,395611	0,2308699	0,2050525	0,1795206	0,1961845
20	0,6649962	0,7618675	0,815473	0,44222	0,2796605	0,2508391	0,2219263	0,2408324
21	0,7032352	0,7908007	0,8385912	0,4945397	0,3378473	0,3063474	0,2742393	0,2952791
22	0,7416731	0,8193605	0,8612044	0,550079	0,4030068	0,3696223	0,335015	0,357743
23	0,7804789	0,8476973	0,8834472	0,6091474	0,4755135	0,4413652	0,4053301	0,4290515
24	0,8218638	0,8774046	0,906567	0,6754601	0,5601001	0,526784	0,4909217	0,5145914
25	0,8639518	0,9071094	0,9294901	0,7464128	0,6534891	0,6232011	0,5899029	0,6119415
26	0,9069526	0,9369644	0,9523406	0,8225631	0,7560996	0,7316571	0,7041745	0,7224181
27	0,9527528	0,9682485	0,9760906	0,9077379	0,8727064	0,8580922	0,8412455	0,8524656
28	1	1	1	1	1	1	1	1
29	1,0477263	1,0315696	1,023585	1,0977303	1,1347151	1,154658	1,1789421	1,1626511

Se graficaron las funciones para ver cuál simulaba un comportamiento más similar al de las velocidades trabajadas como se indicó, y como base de menor valor de desviación estándar se seleccionó la función $D2 = f(\alpha) = -\ln((1-\alpha)^{-1})$.

Una vez obtenida la función se hizo el procedimiento de calcular el factor pre exponencial. Para lo cual se dividió la tasa de conversión sobre la función y a este valor se le halló el algoritmo natural para posteriormente graficarlo con el inverso de la temperatura (1/T) hallado anteriormente en la tabla H, este proceso se realizó para cada velocidad, ya que se busca que las condiciones halladas modelen el comportamiento de las 3 velocidades.

BS	BT	BU	BV
	5 °C/min	10 °C/min	15°C/min
f(a) D2	ln(da/dt/D2)	ln(da/dt/D2)	ln(da/dt/D2)
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
121,320742	-12,337745	-11,57473	-11,165049
58,3089157	-11,458459	-10,804128	-10,345782
36,5738085	-10,905024	-10,238176	-9,8127685
26,3551058	-10,463282	-9,861214	-9,4212919
20,2946745	-10,151243	-9,4917483	-9,0795232
16,0530616	-9,8484978	-9,2150296	-8,7565753
13,0832726	-9,5800132	-8,9011463	-8,4760809
10,9386916	-9,3093403	-8,6738432	-8,2254824
9,20890128	-9,055859	-8,4049257	-7,9846876
7,89092	-8,8261778	-8,1971045	-7,7651073
6,83911263	-8,6359445	-7,9690472	-7,5486328
5,93397835	-8,4037111	-7,7705079	-7,3367551
5,19754451	-8,1903504	-7,5526395	-7,1481847
4,59582492	-8,0461781	-7,3909636	-6,9659578

De la gráfica de $(\ln((d\alpha/dt)/f(\alpha)) \text{ vs } 1/T)$ obtenemos la recta $y = -41050x + 65,037$ y $R^2 = 0,9351$. Dónde:

b	65,037
A	1,76E+28
R=	8,314
E=-a*R	341289,7
a	-41050

Se halló el valor real de la energía de activación como se indica en la tabla anterior, dando desarrollo al modelo.

- Validación del modelo**

Para la comprobación del modelo por medio de la función $f(\alpha)$ que modela su comportamiento, se hace el hallazgo de un (α) teórico y así poder comprobar que

el comportamiento del α experimental es similar al teórico. Primero calculamos $f(\alpha)$ con un valor de ($\alpha = 0,009$).

B	C	D	E	F	G
T (°C)	a	da/dt		E	A*f(a)
267,131	0,009	0,001957642		341289,2651	1,94511E+30
267,554	0,01878821	0,000990271		341289,2651	9,27151E+29
267,967	0,023739566	0,000828394		341289,2651	7,31928E+29
268,372	0,027881538	0,000744928		341289,2651	6,21878E+29
268,796	0,031606177	0,000695963		341289,2651	5,47546E+29
269,209	0,035085993	0,000662975		341289,2651	4,92358E+29
269,615	0,038400866	0,000639934		341289,2651	4,49088E+29
270,04	0,041600536	0,000625688		341289,2651	4,13861E+29
270,457	0,044728976	0,000615658		341289,2651	3,84291E+29
270,865	0,047807266	0,000608604		341289,2651	3,58971E+29
271,287	0,050850288	0,000605686		341289,2651	3,36954E+29
271,699	0,053878717	0,000604223		341289,2651	3,17511E+29
272,106	0,056899829	0,000604281		341289,2651	3,00177E+29
272,53	0,059921236	0,000607414		341289,2651	2,84589E+29
272,946	0,062958307	0,00061123		341289,2651	2,70427E+29
273,348	0,066014459	0,00061508		341289,2651	2,57492E+29
273,767	0,069089858	0,000621499		341289,2651	2,45629E+29
274,182	0,072197353	0,000628539		341289,2651	2,34669E+29

B	C	D	E	F	G
T (°C)	a	da/dt		E	A*f(a)
274,425	0,009	0,005386098		341289,2651	1,94511E+30
275,257	0,035930491	0,001491034		341289,2651	4,80577E+29
276,072	0,043385663	0,001374579		341289,2651	3,96466E+29
276,918	0,050258559	0,001326405		341289,2651	3,41027E+29
277,745	0,056890582	0,001306146		341289,2651	3,00228E+29
278,557	0,063421314	0,001302966		341289,2651	2,68388E+29
279,405	0,069936145	0,001319958		341289,2651	2,42548E+29
280,239	0,076535934	0,001344294		341289,2651	2,20855E+29
281,055	0,083257404	0,001373429		341289,2651	2,02295E+29
281,903	0,090124548	0,001415545		341289,2651	1,8619E+29
282,731	0,097202275	0,001459704		341289,2651	1,71971E+29
283,541	0,104500793	0,001505756		341289,2651	1,59324E+29
284,384	0,112029572	0,001563741		341289,2651	1,48003E+29
285,215	0,119848275	0,001623954		341289,2651	1,37749E+29
286,032	0,127968045	0,00168572		341289,2651	1,28426E+29
286,879	0,136396644	0,001758907		341289,2651	1,1992E+29

B	C	D	E	F	G
T (°C)	a	da/dt		E	A*f(a)
277,566	0,01	0,007430021		341289,2651	1,74971E+30
278,81	0,047150105	0,00182895		341289,2651	3,64099E+29
280,031	0,056294857	0,001796519		341289,2651	3,03499E+29
281,304	0,065277453	0,001828418		341289,2651	2,605E+29
282,55	0,074419545	0,001884252		341289,2651	2,27392E+29
283,766	0,083840803	0,001955366		341289,2651	2,00824E+29
285,035	0,093617635	0,002059722		341289,2651	1,78904E+29
286,285	0,103916246	0,002174746		341289,2651	1,60272E+29
287,509	0,114789974	0,002296991		341289,2651	1,44223E+29
288,78	0,126274928	0,00244846		341289,2651	1,30271E+29
290,024	0,138517226	0,00260492		341289,2651	1,17942E+29
291,242	0,151541828	0,002766048		341289,2651	1,07009E+29
292,51	0,165372069	0,002959862		341289,2651	9,72799E+28
293,755	0,180171381	0,003150048		341289,2651	8,85103E+28

Con los datos anteriores se corroboró para cada velocidad que tan similar estaba el comportamiento de la conversión (α) experimental de la teórica. A continuación, en las figuras (56), (57) y (58) se muestra la comparación de cada velocidad por separado.

Figura 56. Representación de α teórico y experimental para una velocidad de 15°C/min.

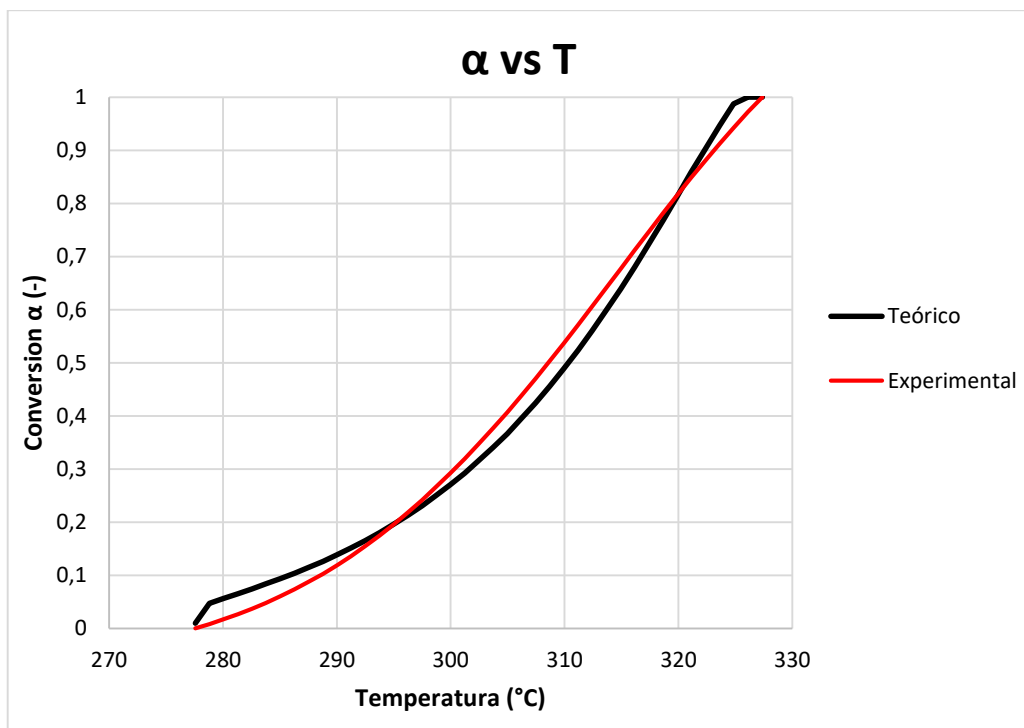


Figura 57. Representación de α teórico y experimental para una velocidad de 10°C/min.

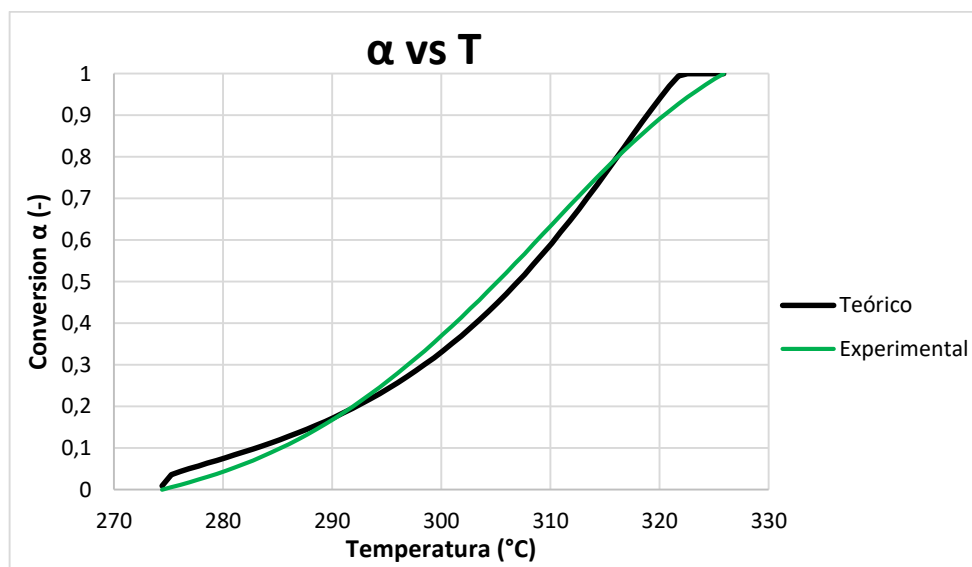
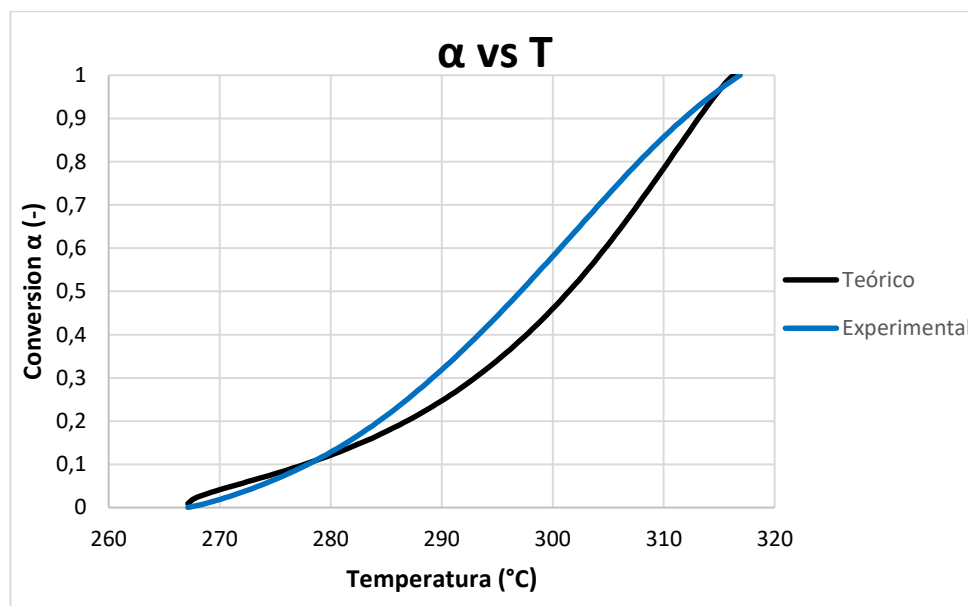


Figura 58. Representación de α teórico y experimental para una velocidad de 5°C/min.



Anexo D. Modelamiento de reacciones paralelas pruebas no isotérmicas torrefactadas

Inicialmente se establecieron los parámetros de trabajo con las reacciones que se utilizarían para el ajuste, se normalizo la masa, se calculó la conversión su respectiva tasa y se empleó la función a utilizar $(1-\alpha)$.

B	C	D	E	F	G	H	I
T	m	dm/dt	W	dW/dt	α	1- α	da/dt
107	8,926	0	1	0	0	1	0
107,005	8,926	0	1	0	0	1	0
107,016	8,926	0	1	0	0	1	0
107,047	8,926	0	1	0	0	1	0
107,149	8,926	0	1	0	0	1	0
107,382	8,926	0	1	0	0	1	0
107,737	8,926	0	1	0	0	1	0
108,186	8,926	0	1	0	0	1	0
108,644	8,926	0	1	0	0	1	0
109,08	8,926	0	1	0	0	1	0
109,513	8,926	0	1	0	0	1	0
109,921	8,926	0	1	0	0	1	0
110,321	8,926	0	1	0	0	1	0
110,743	8,926	0	1	0	0	1	0
111,164	8,926	0	1	0	0	1	0
111,582	8,926	0	1	0	0	1	0
112,017	8,926	0	1	0	0	1	0
112,44	8,926	0	1	0	0	1	0

Se calculan los valores con los parámetros, con la función seleccionada, su respectiva conversión, derivada y los valores de las constantes.

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	HEMICELLULOSE								CELLULOSE			
2	da/dt	α	1- α	da/dt	k1	k2	k3	k4	α	1- α	da/dt	k1
3	7.386E-07	0	1.00000E+00	9.686E-10	4.843E-09	4.845E-09	4.845E-09	4.846E-09	0	1.00000E+00	1.42E-12	7.119E-
4	7.387E-07	4.84457E-09	1.00000E+00	9.692E-10	4.846E-09	4.849E-09	4.849E-09	4.853E-09	7.12220E-12	1.00000E+00	1.43E-12	7.125E-
5	7.391E-07	9.69398E-09	1.00000E+00	9.705E-10	4.853E-09	4.862E-09	4.862E-09	4.872E-09	1.42541E-11	1.00000E+00	1.43E-12	7.139E-
6	7.4E-07	1.45561E-08	1.00000E+00	9.743E-10	4.872E-09	4.903E-09	4.903E-09	4.934E-09	2.14114E-11	1.00000E+00	1.44E-12	7.176E-
7	7.43E-07	1.94588E-08	1.00000E+00	9.868E-10	4.934E-09	5.006E-09	5.006E-09	5.079E-09	2.86501E-11	1.00000E+00	1.46E-12	7.301E-
8	7.501E-07	2.44652E-08	1.00000E+00	1.016E-09	5.079E-09	5.193E-09	5.193E-09	5.309E-09	3.60978E-11	1.00000E+00	1.52E-12	7.536E-
9	7.61E-07	2.96585E-08	1.00000E+00	1.062E-09	5.309E-09	5.459E-09	5.459E-09	5.613E-09	4.39264E-11	1.00000E+00	1.61E-12	8.066E-
10	7.75E-07	3.51182E-08	1.00000E+00	1.123E-09	5.613E-09	5.775E-09	5.775E-09	5.941E-09	5.23063E-11	1.00000E+00	1.74E-12	8.702E-
11	7.895E-07	4.08940E-08	1.00000E+00	1.188E-09	5.941E-09	6.104E-09	6.104E-09	6.27E-09	6.13527E-11	1.00000E+00	1.88E-12	9.4E-
12	8.035E-07	4.69963E-08	1.00000E+00	1.254E-09	6.27E-09	6.44E-09	6.44E-09	6.614E-09	7.11058E-11	1.00000E+00	2.02E-12	1.011E-
13	8.176E-07	5.34391E-08	1.00000E+00	1.323E-09	6.614E-09	6.782E-09	6.782E-09	6.955E-09	8.15970E-11	1.00000E+00	2.18E-12	1.088E-
14	8.31E-07	6.02222E-08	1.00000E+00	1.391E-09	6.955E-09	7.128E-09	7.128E-09	7.305E-09	9.28538E-11	1.00000E+00	2.33E-12	1.165E-
15	8.445E-07	6.73508E-08	1.00000E+00	1.461E-09	7.305E-09	7.497E-09	7.497E-09	7.693E-09	1.04897E-10	1.00000E+00	2.49E-12	1.245E-
16	8.589E-07	7.48481E-08	1.00000E+00	1.533E-09	7.693E-09	7.894E-09	7.894E-09	8.099E-09	1.17795E-10	1.00000E+00	2.67E-12	1.336E-
17	8.734E-07	8.27425E-08	1.00000E+00	1.62E-09	8.099E-09	8.309E-09	8.309E-09	8.523E-09	1.31631E-10	1.00000E+00	2.87E-12	1.433E-
18	8.881E-07	9.10519E-08	1.00000E+00	1.705E-09	8.523E-09	8.752E-09	8.752E-09	8.987E-09	1.46466E-10	1.00000E+00	3.07E-12	1.535E-
19	9.036E-07	9.98048E-08	1.00000E+00	1.797E-09	8.987E-09	9.221E-09	9.221E-09	9.46E-09	1.62387E-10	1.00000E+00	3.3E-12	1.65E-
20	9.188E-07	1.09026E-07	1.00000E+00	1.892E-09	9.46E-09	9.699E-09	9.699E-09	9.943E-09	1.79478E-10	1.00000E+00	3.54E-12	1.77E-

Una vez calculadas las funciones con los valores de las reacciones finales, se procedió a unificar los valores con la proporción de cantidad de masa normalizada seleccionada y así obtener un valor de conversión final teórica, también se halló el valor de conversión experimental.

Los resultados finales obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR
HEMICELULOSE			CELULOSE			LIGNINA		
A	3,96E+11	(1/s)	A	1,52E+16	(1/s)	A	7,39E+00	(1/s)
E	1,50E+05	(J/mol)	E	2,04E+05	(J/mol)	E	4,90E+04	(J/mol)
n	1		n	1		n	3	
%	0,118		%	0,345		%	0,537	
HEMICELULOSE_2			CELULOSE_2			LIGNINA_2		
A	3,76E+06	(1/s)	A	3,03E+06	(1/s)	A	2,07E+03	(1/s)
E	1,30E+05	(J/mol)	E	1,30E+05	(J/mol)	E	1,00E+05	(J/mol)
n	1		n	2		n	0,6	
%	0		%	0		%	0	

El procedimiento para la ejecución del modelo de reacciones paralelas para las velocidades de 10°C/min y 15°C/min fue exactamente el mismo.

Anexo E. Modelo isoconversional de las pruebas isotérmicas de la masa seca sin torrefactor

Inicialmente se seleccionaron los datos a partir del proceso isotérmico, para normalizar su masa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Contador	Time	Temp	Peso	DTG		Time	Temp	Peso	DTG
2		s	°c	mg	mg/s		s	°c	mg	mg/s
3										
4	0	0	32,09	14,202	-6,25E-04		5454,6	274,99	10,723	-0,00353
5	5	4,8	32,03	14,199	-5,21E-04		5460	275	10,704	-0,00343
6	10	9,6	32,05	14,197	-4,86E-04		5464,8	275	10,688	-0,00344
7	15	15	32,43	14,194	-4,86E-04		5469,6	275	10,671	-0,00344
8	20	19,8	33,27	14,192	-4,17E-04		5475	275	10,653	-0,00333
9	25	24,6	34,75	14,19	-5,79E-04		5479,8	275	10,637	-0,00333
10	30	30	37,18	14,186	-8,91E-04		5484,6	275	10,621	-0,00333
11	35	34,8	39,8	14,181	-0,00115		5490	275	10,603	-0,00323
12	:	:	:	:	:		:	:	:	:

Se normalizo la masa, se halló la conversión y sus respectivas derivadas.

▲	K	L	M	N	O	P
1	w		dw/dt	α	(-)dα/dt	Time
2						s
3	I4/\$I\$4	J4/\$J\$4	(\$L\$4-L4)/(\$L\$4-\$L\$684)	(M4)*(1/(\$L\$4-\$L\$684))	G4-\$G\$4	
4	1	-0,000329199	0	0,001166942	0	
5	0,998228108	-0,000319873	0,006280992	0,001133884	5,4	
6	0,996735988	-0,000320806	0,011570248	0,00113719	10,2	
7	0,995150611	-0,000320806	0,017190083	0,00113719	15	
8	0,993471976	-0,000310547	0,023140496	0,001100826	20,4	
9	0,991979856	-0,000310547	0,028429752	0,001100826	25,2	
10	0,990487737	-0,000310547	0,033719008	0,001100826	30	
11	0,988809102	-0,000301222	0,039669421	0,001067769	35,4	
12	:	:	:	:	:	
13	0,987311034	-0,000291233	0,044638898	0,001067769	40	

Se redujo el rango de datos para la realización del modelo isoconversional, tomando valores de α desde 0,05 hasta 0,95 valores que se buscaron en los anteriormente calculados.

R	S	T	U
α	α_{exp}	Time	da/dt
	BUSCAR(R4;\$N\$4:\$N\$684;\$N\$4:\$N\$684)	BUSCAR(R4;\$N\$4:\$N\$684;\$P\$4:\$P\$684)	BUSCAR(R4;\$N\$4:\$N\$684;\$O\$4:\$O\$684)
0,05	0,049917355	45	0,001071074
0,1	0,096198347	90	0,001004959
0,15	0,148429752	145,2	0,000895868
0,2	0,196363636	200,4	0,000809917
0,25	0,247603306	265,2	0,000723967
0,3	0,298181818	335,4	0,000677686
0,35	0,347107438	410,4	0,000614876
0,4	0,398347107	495	0,000585124
:	:	:	:
0,95	0,949752066	2815,2	0,000103306

Este procedimiento se realizó para cada una de las temperaturas, los datos anteriores corresponden a la temperatura de 275°C.

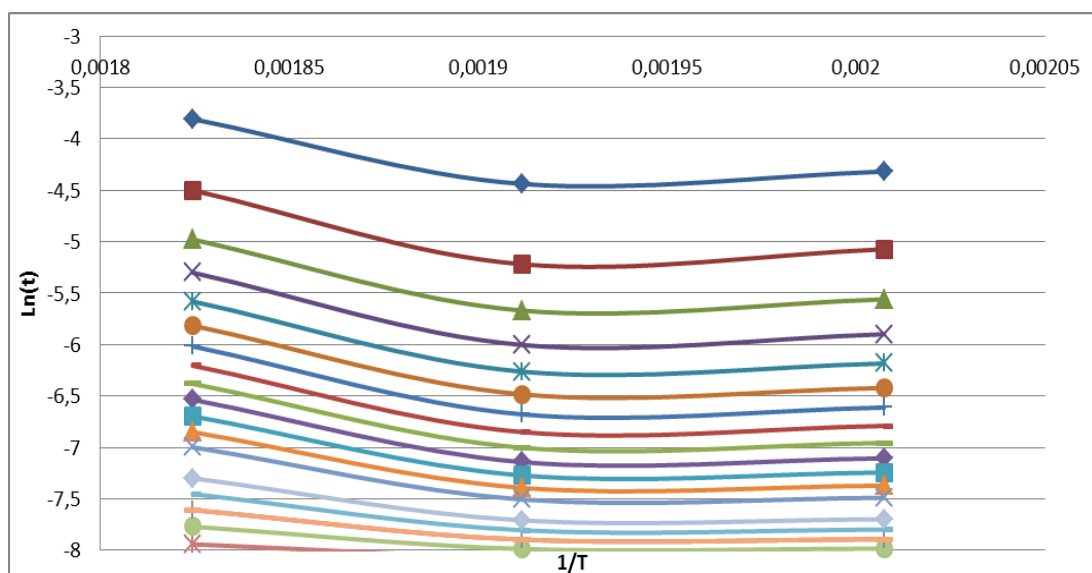
Se hizo la agrupación del rango de datos de las temperaturas como se muestra a continuación:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	α	α_{275}	Time-275	1/T	α_{250}	Time-250	1/T	α_{225}	Time-225	1/T
2		275°C!\$3	275°C!T3	1/(275+273,15)						
3	0,05	0,049917355	45	0,001824318	0,0478723	84,6	0,0019115	0,047619	75	0,0020074
4	0,1	0,096198347	90	0,001824318	0,0984043	184,8	0,0019115	0,0980392	159,6	0,0020074
5	0,15	0,148429752	145,2	0,001824318	0,1480496	289,8	0,0019115	0,1484594	259,8	0,0020074
6	0,2	0,196363636	200,4	0,001824318	0,1985816	405	0,0019115	0,1988796	364,8	0,0020074
7	0,25	0,247603306	265,2	0,001824318	0,248227	525	0,0019115	0,2492997	484,8	0,0020074
8	0,3	0,298181818	335,4	0,001824318	0,2978723	654,6	0,0019115	0,2997199	615	0,0020074
9	0,35	0,347107438	410,4	0,001824318	0,3492908	795	0,0019115	0,3473389	744,6	0,0020074
10	0,4	0,398347107	495	0,001824318	0,3998227	945	0,0019115	0,3977591	889,8	0,0020074
11	0,45	0,449917355	590,4	0,001824318	0,4494681	1099,8	0,0019115	0,4481793	1050	0,0020074
12	0,5	0,49785124	690	0,001824318	0,4991135	1264,8	0,0019115	0,4985994	1219,8	0,0020074
13	0,55	0,549090909	810	0,001824318	0,5496454	1440	0,0019115	0,5490196	1399,8	0,0020074
14	0,6	0,599669421	945	0,001824318	0,5992908	1624,8	0,0019115	0,5994398	1590	0,0020074
15	0,65	0,648595041	1095	0,001824318	0,6498227	1819,8	0,0019115	0,6498599	1789,8	0,0020074
16	0,7	0,699504132	1275	0,001824318	0,6994681	2019,6	0,0019115	0,697479	1984,8	0,0020074
17	0,75	0,749090909	1480,2	0,001824318	0,7491135	2229,6	0,0019115	0,7478992	2205	0,0020074
18	0,8	0,799669421	1725	0,001824318	0,7996454	2454,6	0,0019115	0,7983193	2439,6	0,0020074
19	0,85	0,849586777	2015,4	0,001824318	0,8492908	2689,8	0,0019115	0,8487395	2679,6	0,0020074
20	0,9	0,899504132	2370	0,001824318	0,8998227	2944,8	0,0019115	0,8991597	2934,6	0,0020074
21	0,95	0,949752066	2815,2	0,001824318	0,9494681	3204,6	0,0019115	0,9495798	3195	0,0020074
22			T=275°C			T=250°C			T=225°C	

Para el cálculo de la energía de activación promedio es necesario calcular el logaritmo natural de nuestra variable cambiante, en este caso el tiempo y el inverso de la temperatura en kelvin, y así obtener la pendiente entre estos.

L	M	N	O	P	Q	R
(-) LN(t) 275	(-)LN(t) 250	(-)LN(t) 225		275	250	225
LN(C3)	LN(F3)	LN(I3)				
-3,80666249	-4,43793427	-4,31748811		0,00182432	0,0019115	0,00200743
-4,49980967	-5,21927416	-5,07267069		0,00182432	0,0019115	0,00200743
-4,978112102	-5,66919103	-5,5599121		0,00182432	0,0019115	0,00200743
-5,300315369	-6,00388707	-5,89934926		0,00182432	0,0019115	0,00200743
-5,580484258	-6,26339826	-6,18373643		0,00182432	0,0019115	0,00200743
-5,815323849	-6,48402436	-6,42162227		0,00182432	0,0019115	0,00200743
-6,017132294	-6,67834211	-6,61284716		0,00182432	0,0019115	0,00200743
-6,204557763	-6,85118493	-6,79099672		0,00182432	0,0019115	0,00200743
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮

Se obtuvo el valor de la pendiente de cada dato y al multiplicarlo por la constante de los gases se obtuvo la energía de activación para cada valor (ver siguiente gráfica), hallando así el valor promedio de la energía de activación.



T	U	V	W	X
PENDIENTE	(-)E(J/MOL)	E(KJ/MOL)		E_PROM
PENDIENTE(L3:N3;P3:R3)	T3*8,314	U3/1000		PROMEDIO(V3:V22)
-2722,264236	22632,9049	22,6329049		21,48411115
-3050,855329	25364,8112	25,3648112		
-3105,3479	25817,8624	25,8178624		
-3198,72051	26594,1623	26,5941623		
-3225,698054	26818,4536	26,8184536		
-3245,057447	26979,4076	26,9794076		
-3187,684615	26502,4099	26,5024099		
-3138,79428	26095,9356	26,0959356		
:	:	:		

Para la eliminación del factor de frecuencia se desarrolló la ecuación 26, en la cual justo en $g(\alpha = 0,5)/g(\alpha = 0,5)$ tendremos un valor de 1 para todas las funciones.

Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN
α	P1	P2	P3	P4	R2	R3	F1	A2	A3	A4	D1	D2	D3	D4
0,05	0,56234133	0,46415888	0,31622777	0,03162278	0,08644982	0,08217388	0,07400058	0,27203048	0,41983474	0,52156541	0,01	0,00828652	0,00675255	0,00774085
0,1	0,6687403	0,58480355	0,4472136	0,08944272	0,17520618	0,16728407	0,15200309	0,38987574	0,53368395	0,62440031	0,04	0,03373302	0,02798396	0,03169991
0,15	0,7400828	0,66943295	0,54772256	0,16431677	0,26646419	0,25560784	0,23446525	0,48421612	0,61663215	0,6958564	0,09	0,0772938	0,06533537	0,07309095
0,2	0,79527073	0,7368063	0,63245553	0,25298221	0,36044812	0,34746687	0,32192809	0,56738708	0,68536138	0,75325101	0,16	0,1400356	0,12073323	0,13329624
0,25	0,84089642	0,79370053	0,70710678	0,35355339	0,45741788	0,4432377	0,4150375	0,64423404	0,74592606	0,80264191	0,25	0,22315875	0,19645966	0,21390211
0,3	0,88011174	0,84343267	0,77459667	0,464758	0,55767755	0,54336541	0,51457317	0,71733756	0,80133796	0,84695783	0,36	0,32802396	0,29524597	0,31674491
0,35	0,91469122	0,887904	0,83666003	0,58566202	0,66158659	0,64838214	0,62148838	0,78834534	0,85338369	0,88788814	0,49	0,45618681	0,4203994	0,44397145
0,4	0,94574161	0,92831777	0,89442719	0,71554175	0,76957511	0,7589323	0,73696559	0,858467	0,90326615	0,92653494	0,64	0,60944283	0,57597824	0,59811986
0,45	0,97400375	0,96548938	0,9486833	0,85381497	0,88216502	0,875808	0,86249648	0,92870688	0,95188783	0,96369439	0,81	0,7898878	0,76703965	0,78223028
0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,55	1,02411369	1,03228012	1,04880885	1,15368973	1,12388948	1,13277345	1,15200309	1,07331407	1,0482975	1,03600872	1,21	1,24275564	1,2831757	1,25600744
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Por el valor obtenido en la desviación estándar se seleccionó la función modelada

$$\text{por } P4 = f(\alpha) = \frac{2}{3} * \alpha^{-1/2}$$

AS	AT	AU	AV
275	250	225	
AD PARA P4	0,0011286	0,0012436	0,0008918
	0,0016803	0,0032112	0,0017138
	0,0021269	0,0042004	0,0023687
	0,0014027	0,0045194	0,0021237
	0,0009483	0,0037862	0,0019262
	0,0004549	0,0027872	0,0015542
	8,319E-05	0,0018401	0,0006134
	3,421E-06	0,0009993	0,0001938
	⋮	⋮	⋮
	3,375E-06	0,0002474	4,875E-05
	0	0	0
	0,000409	0,0002301	3,751E-05
	0,0030284	0,0008943	0,0001219
	0,0109681	0,0018856	0,0002232
	0,0366048	0,0035675	0,0008614
	0,0949257	0,0055218	0,0008669
	0,2267115	0,0069149	0,0005692
	0,4960959	0,0080763	0,0003911
	1,0400516	0,0075135	8,371E-05
	2,1346108	0,0072741	9,771E-08
SUMA	4,0512374	0,0647128	0,0145893
NUM DATOS	19	19	19
YMAX	4,08	2,5336812	2,6192818
AD PARA P4	11,317666	2,3033834	1,0579328
AD PROM		4,892994142	

Se realizó el cálculo de los valores de la función con cada valor de α para obtener así los valores de energía de activación y del factor pre exponencial.

BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV
LN(g(α))P4	275	250	225		f(α) P4	275	250	225
LN(BI3^(3/2))	\$BN3+L3	\$BN2+M2	\$BN2+N2		(2/3)*(BI2)^(-1/2)			
-4,49359841	-8,3002609	-8,9315327	-8,8110865		2,98142397	-7,931494069	-8,647764127	-8,5959125
-3,453877639	-7,9536873	-8,6731518	-8,5265483		2,108185107	-7,648636293	-8,426354696	-8,2493389
-2,845679977	-7,8237921	-8,514871	-8,4055921		1,721325932	-7,56081262	-8,223622142	-7,9894482
-2,414156869	-7,7144722	-8,4180439	-8,3135061		1,490711985	-7,517832194	-8,125243212	-7,8456071
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
3,070441E+03	7,6500358	8,3400000	8,303470		4,33333333	7,518446000	8,340500400	7,7340354

Teniendo así como resultado:

B	-3,142
A	0,0431963
A	-2584,1
E	21484,2074

- **Validación de resultados**

Se recalculan los valores de α y $d\alpha/dt$ de forma teórica para cada temperatura para hacer la comparación con los datos experimentales.

CS	CT	CU
275		
t(s)	α	$d\alpha/dt$
	$CT5+(5*CU5)$	$((2/3)*(CT6)^{-1/2})*\$BT\$28*EXP(-\$BT\$30/(8,314*\$CQ\$3))$
0	0	0,001166942
5,4	0,00583471	0,003380537
10,2	0,02273739	0,001712478
⋮	⋮	⋮

Los resultados fueron explicados en la sección 7.2.1.

NOTA: El modelo isoconversional y de reacciones paralelas para las muestras isotermicas torrefactadas se llevo a cabo de la misma forma que para los modelos anteriormente explicados, basados en las mismas ecuaciones y parametros de selección.

Anexo F. Estudio de campo de la sección de comedores de la universidad industrial de Santander

La Universidad Industrial de Santander cuenta con apoyos alimenticios para estudiantes de estratos bajos, brindándoles de lunes a viernes desayuno, almuerzo y cena, aproximadamente el servicio es prestado a 2000 estudiantes, es de aclarar que más de 1000 estudiantes de los 2000 cuentan con el beneficio de las tres comidas. La mayoría de los estudiantes cuenta con el beneficio de almuerzo y cena que es donde se presenta una mayor cantidad de desperdicio alimenticio, presentando un índice de desperdicio de comida de 124,4 kg semanal entre líquidos (sopa) y sólidos (arroz, papa, ensaladas, carnes), lo que lleva a un total de 497, 6 kg mensuales.

Los desperdicios son recogidos en baldes separando los residuos líquidos y sólidos, donde aproximadamente los desperdicios de residuos líquidos tienen un peso de 8,9 kg y los de sólidos de 6,5 kg, sacando aproximadamente 3 baldes diarios de cada uno. También se obtienen 13,2 kg de desperdicio de la cafetería de bienestar universitario.

Figura 59. Desperdicio de residuos alimenticios de la sección de comedores.



Posteriormente a la recolección de desperdicios estos son depositados por medio de un ducto auxiliar en canecas

Figura 60. Depósito final de los desperdicios alimenticios de la sección de comedores y cafetería de bienestar.



Los desechos que salen cada semana son completamente desechados o regalados a personas de los alrededores que los utilizan para alimentar animales de granja.)