

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE LA CINÉTICA DEL SECADO EN
ESTADO TRANSITORIO DE LA CASCARILLA DE ARROZ AUTÓCTONA DE LA
REGIÓN CARIBE

POR:

JONATHAN FABREGAS VILLEGAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
BARRANQUILLA

2015

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE LA CINÉTICA DEL SECADO EN
ESTADO TRANSITORIO DE LA CASCARILLA DE ARROZ AUTÓCTONA DE LA
REGIÓN CARIBE

JONATHAN FABREGAS VILLEGAS

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA

Director

ARGEMIRO PALENCIA DIAZ, MSc.

Codirector

KHRISCIA SIRELG CECILIA UTRIA SALAS, MSc.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
BARRANQUILLA

2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitir llevar a cabo estas valiosas etapas.

A todas las personas que me apoyaron en mi proceso de aprendizaje y compartieron sus conocimientos profesionales.

A mis padres que me dan su apoyo, alegría, vida en este día a día.

A mis compañeros amigos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	9
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.1. Planteamiento del problema	11
1.2. JUSTIFICACIÓN	15
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.3.1. Objetivo General.....	17
1.3.2. Objetivos Específicos.....	17
2. MARCO REFERENCIAL	18
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	18
2.2. ANTECEDENTES	19
2.3. MARCO TEÓRICO	21
2.3.1. Características físico químicas de la cascarilla de arroz.....	21
2.3.2. Transferencia de masa	24
2.3.3. Clasificación de las operaciones de transferencia de masa.	24
2.3.4. Contacto directo de dos fases inmiscibles	25
2.3.4.1. Contacto entre fases Líquido – Líquido	25
2.3.4.2. Contacto entre fases Líquido-Gas	26
2.3.4.3. Contacto entre fases Gas-Gas	27
2.3.4.4. Contacto entre fases Sólido-Sólido	28
2.3.4.5. Contacto entre fases Líquido- Sólido.....	28
2.3.4.6. Contacto entre fases Sólido-Gas.....	29
2.3.5. Difusión en la transferencia de masa.....	30

2.3.5.1.	Difusión de masa en líquidos.....	34
2.3.5.2.	Difusión de masa en gases	35
2.3.5.3.	Difusión de masa en Sólidos	36
2.3.6.	Secado de sólidos	39
2.3.6.1.	Velocidad del secado	40
2.3.6.2.	Contenido de humedad	43
2.3.6.3.	Humedad de equilibrio.....	45
2.3.6.4.	Analogía entre la transferencia de calor y transferencia de masa	47
2.3.6.5.	Termodinámica de la Mezcla de gases.	56
2.3.6.6.	Modelos matemáticos en el análisis numérico CFD	58
3.	METODOLOGÍA.....	63
3.1.	Diseño de experimento	65
3.2.	Tratamientos del diseño experimental	66
3.3.	Construcción del banco de pruebas y elementos de medición de datos.....	68
3.4.	Cálculos de las variables de entrada del proceso	69
4.	RESULTADOS	88
4.1.	Curvas y modelos matemáticos por tratamientos de secado	88
4.2.	Análisis del diseño experimental factorial	103
4.3.	Modelación numérica	110
4.4.	Comparación experimental y computacional.	115
5.	CONCLUSIONES.....	119
6.	RECOMENDACIONES	121
	REFERENCIAS	122

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. PRODUCCIÓN DE ARROZ MECANIZADO EN TONELADAS POR DEPARTAMENTO. .	12
FIGURA 2. CASCARILLA DE ARROZ.	22
FIGURA 3. ESQUEMA DE TRANSFERENCIA DE MASA LÍQUIDO – LÍQUIDO.	26
FIGURA 4. ESQUEMA DE LA OPERACIÓN DE HUMIDIFICACIÓN.	27
FIGURA 5. ESQUEMA DE UNA OPERACIÓN POR LIXIVIACIÓN.	28
FIGURA 6. CÁMARA SECADORA DE SÓLIDOS.	29
FIGURA 7. FUNCIÓN DE CHOQUE MOLECULAR.	36
FIGURA 8. REPRESENTACIÓN DE LOS MECANISMOS: A) DIFUSIÓN POR VACANTE Y B) DIFUSIÓN INTERSTICIAL.	37
FIGURA 9. CURVA DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO.	41
FIGURA 10. RAPIDEZ DE SECADO.	42
FIGURA 11. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA.	48
FIGURA 12. ANALOGÍA ENTRE LA CONDUCCIÓN DE CALOR Y LA DIFUSIÓN DE MASA.	54
FIGURA 13. ESQUEMA DE LA DIFUSIÓN DE MASA MEDIANTE CFD.	61
FIGURA 14. RESULTADO DE LA DIFUSIÓN DE MASA MEDIANTE CFD.	61
FIGURA 15. BANCO DE PRUEBAS EXPERIMENTAL.	69
FIGURA 16. MODELO CAD DE LA ZONA DE ESTUDIO A MODELAR EN CFD.	83
FIGURA 17. MALLADO VOLUMÉTRICO DEL SISTEMA A MODELAR.	84
FIGURA 18. ESQUEMA DE ESTUDIO PARA LA EXPERIMENTACIÓN Y MODELACIÓN.	85
FIGURA 19. DIAGRAMA DE PARETO ESTANDARIZADA PARA LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO.	106
FIGURA 20. DIAGRAMA DE PARETO ESTANDARIZADA PARA EL TIEMPO DE EQUILIBRIO. ..	107
FIGURA 21. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO. .	108
FIGURA 22. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL TIEMPO DE EQUILIBRIO.	108
FIGURA 23. FRACCIÓN DE VOLUMEN A CONDICIONES DE 1,6 M/S 363 K 55 HR.	111
FIGURA 24. PERFIL DE TEMPERATURA A CONDICIONES DE 1,6 M/S 363 K 55 HR.	112
FIGURA 25. FRACCIÓN DE VOLUMEN A CONDICIONES DE 1,6 M/S 383 K 80 HR.	113

FIGURA 26. PERFIL DE TEMPERATURA A CONDICIONES DE 1,6 M/S 383 K 80 HR.	114
FIGURA 27. FRACCIÓN DE VOLUMEN PARA CONDICIÓN DE PROCESO DE 1,6 M/S 363 K 55 HR. A) MODELACIÓN NUMÉRICA B) EXPERIMENTACIÓN.....	115
FIGURA 28. COMPARACIÓN ENTRE MUESTRA EXPERIMENTAL Y MODELACIÓN NUMÉRICA, PARA CONDICIONES DE 1,6 M/S 363 K 55 HR POR GRAFICO DE HISTOGRAMAS Y DE CUANTILES.	116
FIGURA 29. FRACCIÓN DE VOLUMEN PARA CONDICIÓN DE PROCESO DE 1,6 M/S 383 K 80 HR. A) MODELACIÓN NUMÉRICA B) EXPERIMENTACIÓN.....	116
FIGURA 30. COMPARACIÓN ENTRE MUESTRA EXPERIMENTAL Y MODELACIÓN NUMÉRICA, PARA CONDICIONES DE 1,6 M/S 383 K 80 HR POR GRAFICO DE HISTOGRAMAS Y DE CUANTILES.	117

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1. PODER CALORÍFICO INFERIOR DE LA CASCARILLA DE ARROZ EN FUNCIÓN AL CONTENIDO DE HUMEDAD.	11
TABLA 2. ANÁLISIS PRÓXIMO DE LA CASCARILLA DE ARROZ EN COLOMBIA.	22
TABLA 3. COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA CASCARILLA DE ARROZ A DIFERENTES % DE HUMEDAD EN COLOMBIA.	23
TABLA 4. FACTOR DE ASOCIACIÓN PARA DISOLVENTES.	35
TABLA 5. FUNCIÓN DE ERROR.	38
TABLA 6. COEFICIENTES DE ECUACIÓN HENDERSON MODIFICADA, PARA DIVERSOS PRODUCTOS.	47
TABLA 7. PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS ALIMENTOS.	50
TABLA 8. PROPIEDADES DEL AIRE A 1 ATM.	52
TABLA 9. DISEÑO DE CRIBADO PARA EL EXPERIMENTO.	65
TABLA 10. VARIABLES DE RESPUESTA PARA EL EXPERIMENTO.	66
TABLA 11. TRATAMIENTOS ALEATORIZADO DEL EXPERIMENTO.	66
TABLA 13. CALCULO DE HUMEDAD ABSOLUTA A DETERMINADAS CONDICIONES.	73
TABLA 14. ENTALPIA DE LA MEZCLA DE GASES A DISTINTAS CONDICIONES DE ENTRADA. .	73
TABLA 15. VOLUMEN ESPECÍFICO DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA A DETERMINADA TEMPERATURA.	75
TABLA 16. VOLUMEN ESPECIFICO DE LA MEZCLA DE GASES A DETERMINADAS CONDICIONES.	76
TABLA 17. FLUJO MÁSIKO DE LA MEZCLA DE GASES A DETERMINADAS CONDICIONES.	77
TABLA 18. TASA DE CALOR A TODAS LAS CONDICIONES DE ENTRADA DEL PROCESO.	78
TABLA 19. FRACCIÓN MOLAR PARA LAS CONDICIONES DE ENTRADA DE LA MEZCLA.	82
TABLA 20. FRACCIÓN MOLAR PARA LAS CONDICIONES DE ENTRADA DE LA MEZCLA.	83
TABLA 21. VARIABLES DE RESPUESTA DE LOS TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES.	104
TABLA 22. ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL PARA EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO.	110

INTRODUCCION

El material residual producto de la cosecha de uno de los cereales más importantes en la producción nacional, es la cascarilla de arroz, la cual es utilizada como combustible sólido para obtención de energía, pese a sus propiedades termodinámicas y físicas que lo categorizan como material combustible presenta ineficiencias para su aprovechamiento energético a causa de su contenido de humedad.

Por esto, en el siguiente trabajo se desarrolla el análisis experimental del proceso de secado de la cascarilla de arroz en estado transitorio, el cual se determina de dos formas.

En primera instancia ejecutando un diseño experimental factorial, estudiando el efecto de los factores que intervienen en la cinética de secado y sus interacciones. La segunda forma se establece por medio de modelado numérico en herramientas computacionales a partir de las correlaciones y modelos analíticos identificados en la investigación experimental.

Para la aplicación y desarrollos experimentales antes mencionadas son planteados los pasos metodológicos, para la identificación de las variables que gobiernan en la cinética del secado por medio de revisión bibliográfica, desarrollo de diseños experimentales y software de análisis numérico.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Para el desarrollo nacional en eficiencia energética se hace necesario el uso de la materia prima disponible en la región, la cascarilla de arroz es un residuo que presenta la industria arrocera, la cual contiene características y potenciales aprovechables en la generación de energía, por presentar contenidos de celulosa y sílice que le ayudan a obtener un buen rendimiento como combustible, Sin embargo bajo condiciones ambientales distintas su contenido de humedad estará en porcentajes diferentes, y su poder calorífico es afectado directamente por este contenido como lo identifica V. Agustín, S. Bienvenido y M. José P. [1] El cual se muestra en la tabla 1.

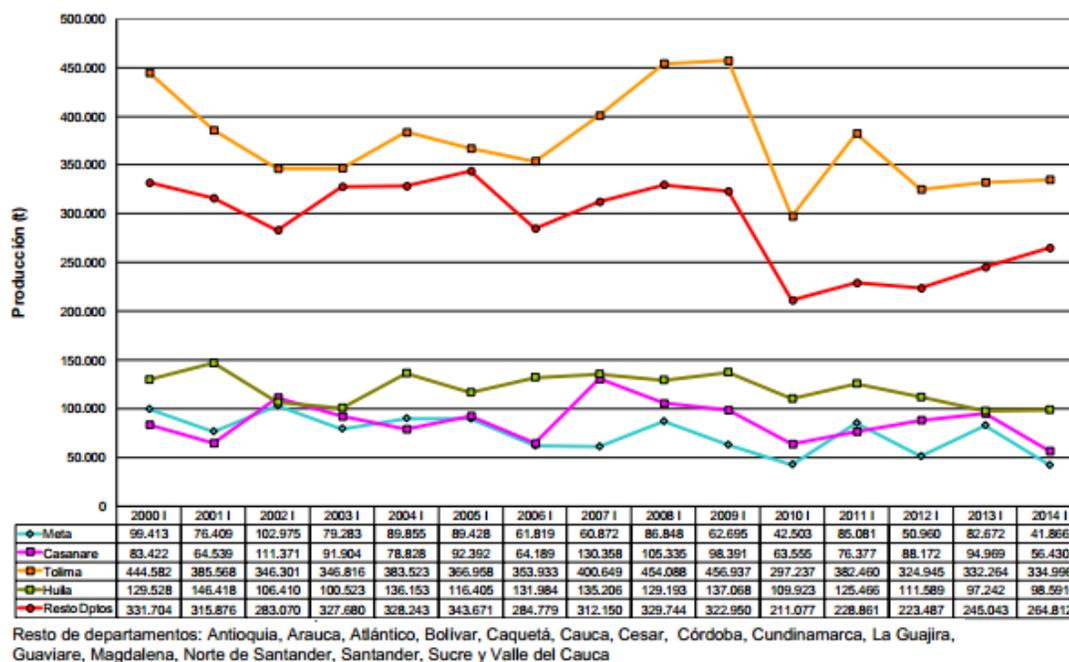
Tabla 1. Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función al contenido de humedad.

CONTENIDO DE HUMEDAD	PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) kJ/kg
0	19880
10	17644
20	15412
30	13180
40	10947
50	8715
60	6413

Fuente: V. Agustín, S. Bienvenido y M. José P., «Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz,» *Scientia Et Technic*.

No obstante la abundancia de esta materia prima, que se mantiene en producción constante haciéndola un recurso importante en aprovechamiento energético, por ser residuo de uno de los cereales de mayor producción nacional. La industria arrocera colombiana FEDEARROZ en su registro nacional del DANE para el primer semestre del año 2014 registra una cantidad en producción de grano de arroz mecanizado de 796.695 toneladas cosechadas (figura 1), en un área promedio nacional de 145.255 hectáreas, del cual el 20% de masa producida en arroz mecanizado resulta en cascarilla de arroz, convirtiéndose en desecho en la producción de material consumible. Al ser residuo del procesamiento del arroz, la cascarilla de arroz no utilizada se acumula por su lenta descomposición [2].

Figura 1. Producción de arroz mecanizado en toneladas por departamento.



Fuente: (DANE), D. A. (21 de Agosto de 2014). ENCUESTA NACIONAL DE ARROZ MECANIZADO I Semestre del 2014. *Boletín de prensa DANE*, págs. 5.

Dado los altos costos que conlleva utilizar combustibles fósiles, la cascarilla de arroz es implementada como combustible sólido para generación de energía, pero por su contenido de humedad el potencial energético como combustible disminuye, para resolver este problema se establece previo a la quema del combustible un proceso de secado que disminuya el contenido de humedad presente en el material biomásico y así mejorar su eficiencia como combustible sólido para generación de energía.

El secado varía según las condiciones ambientales, tanto en la cascarilla de arroz por presentar contenidos de humedad distintos según la zona donde es cultivada a nivel nacional, y las características del entorno como humedad relativa donde se realice el proceso.

Este proceso ha sido estudiado sometiendo a flujo convectivo la cascarilla de arroz a niveles de temperaturas entre los 35°C y 120°C obteniéndose modelos matemáticos ajustados a los efectos termodinámicos de las muestras, tales como la energía libre de Gibbs y energía de activación de la cascarilla de arroz, Metodología que fue implementada por Gabriel H. H. Oliveira y Paulo C. Correa [3].

Entre los alcances de los estudios de secado de la cascarilla de arroz, los modelos obtenidos representan los efectos que tiene la temperatura en el tiempo de secado y la relación de humedad, definiendo a la temperatura como efecto principal en la reducción del contenido de humedad y tiempo de equilibrio en las muestras para un ambiente de estudio en específico.

Dado que otros factores están involucrados en la cinética del secado, esta investigación plantea considerar los efectos que tiene el aumentar o disminuir la cantidad de masa de las muestras, la velocidad del agente secante, las condiciones ambientales como humedad relativa y la interacción entre los efectos con respecto a la cantidad de humedad a secar y los tiempos de equilibrio del material biomásico.

El objetivo principal es establecer modelos matemáticos y computacionales que se ajusten a las cámaras secadoras y permitan mejorar el aprovechamiento de la energía, considerando los efectos de las variables que interactúan en la cinética del secado de la cascarilla de arroz, obteniendo como respuesta el contenido de humedad a secar, tiempo de equilibrio y coeficientes difusivos, por medio de diseño experimental y análisis numérico.

La investigación contribuye con la elaboración de un banco experimental el cual satisfaga el comportamiento de las variables que gobiernan en la cinética del secado, ajustando un modelo matemático que describa el proceso de secado para la cascarilla de arroz en estado transitorio, que permita la generación de correlaciones y soluciones numéricas mediante herramientas computacionales.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Dado que en investigaciones previas el proceso de secado de la cascarilla de arroz ha sido estudiado en base al efecto que tiene la temperatura en el contenido de humedad sobre las muestras tratadas, se hace necesario contar con resultados basados en una cantidad de factores mayor, es por eso que en esta investigación se obtienen modelos matemáticos ajustables a distintas condiciones como la humedad relativa del ambiente, temperatura del proceso, cantidad de masa implementada, velocidad con la que es impulsado el agente secante. Para calcular los tiempos de equilibrio en el secado de la biomasa y la cantidad de humedad deshidratada.

Utilizando como agente secante el aire impulsado a convección forzada a un área en específico de la biomasa, implementando la ley de Fourier de transferencia de calor y la ley de Fick de transferencia de masa por difusión, se realiza un diseño experimental con sistemas de adquisición de datos para obtención de las variables dependientes e independientes en el proceso de secado, estableciendo un método estadístico para ajustar las correlaciones necesarias en el desarrollo de los modelos matemáticos, y así emplear un método de solución numérica mediante herramientas computacionales.

Representando las curvas características de cada tratamiento experimental en el secado de la cascarilla de arroz que aportan datos apreciables para la obtención de coeficientes difusivos en la transferencia de masa.

El estudio y desarrollo de esta investigación permitirá mejor uso de la cascarilla de arroz tomando como argumento el uso de este material biomásico como fuente de aprovechamiento de energía, obteniendo un combustible que en sus emisiones no presenta concentraciones de S ni CO.

Además la ejecución y desarrollo de esta investigación contribuye a la sublínea de investigación en gasificación y a la línea de uso racional de la energía del grupo GIIMA, sin dejar de lado los fines constructivos para la sociedad, implementando esta metodología e instrumentación en otro material biomásico como fuente alterna de energía.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General.

- Caracterizar y modelar la cinética del secado de la cascarilla de arroz autóctona de la región Caribe.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Identificar los modelos y variables consecuentes que intervienen en la realización del proceso de secado de la cascarilla de arroz.
- Establecer un diseño experimental para la construcción de correlaciones numéricas en el proceso de secado.
- Desarrollar un experimento que permita obtener el contenido en porcentaje de la humedad en base seca presente en las muestras de cascarilla de arroz y representar las curvas experimentales de los tratamientos realizados en el proceso de secado de la cascarilla de arroz junto con sus modelos matemáticos.
- Analizar la interacción de los efectos de los factores y las variables de respuesta a través de la interpretación de los gráficos obtenidos en el diseño experimental para identificar los efectos significativos en la construcción de los modelos matemáticos del diseño experimental del proceso de secado de la cascarilla de arroz.
- Solucionar numéricamente el proceso de secado de cascarilla de arroz utilizando herramienta computacional para validar el modelo numérico con lo obtenido experimentalmente.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. ESTADO DEL ARTE

Hasta hace unas décadas, los hornos para generar vapor que existían en el mercado local eran fabricados en Alemania e Italia, y su tamaño, costo y consumo de cáscara en la generación de vapor eran muy altos. La utilización del horno como sustituto de combustible en el secado de arroz fue conocida por los propietarios de la empresa Super-Brix S.A. En la República Dominicana, donde se fabricaba un horno artesanal de ladrillo y barro que no tenía forma de controlar el calor, pero que, de alguna manera, sirvió como idea para el inicio del primer diseño de un equipo comercial nacional. Luego, la necesidad creciente de ahorrar combustibles, de aprovechar desechos contaminantes (neutralizándolos), de incrementar la productividad de la agroindustria, más el deseo de aportar al campo de la investigación tecnológica aplicada, hizo el resto [4].

Los cultivos energéticos realizados con la finalidad de producir biomasa transformable en biocombustibles (en lugar de producir alimentos, como ha sido la actividad tradicional de la agricultura) son ya una realidad en países como Brasil y estados unidos, que enfocan gran parte de la producción de caña de azúcar y maíz, respectivamente, a la obtención de bioetanol [5]. El uso de la biomasa con fines energéticos tampoco supone la emisión de azufre ni de nitrógeno a la atmosfera, y apenas de partículas sólidas. Además como una parte de la biomasa procede de residuos que es necesario eliminar, su aprovechamiento energético supone convertir un residuo en el recurso [6]. A partir de sus características naturales la biomasa tiene componentes necesarios para la generación de energía, como también posee agentes que hacen que el aprovechamiento de su poder calorífico disminuya como lo es el porcentaje de humedad elevado, lo cual hace necesario el proceso en una cámara secadora que permita la deshidratación.

La operación de secado implica procesos de transferencia de masa y de calor entre un gas y un sólido, en los que la humedad contenida en la biomasa se transfiere por evaporación al gas debido a la diferencia de presión que existe entre la presión de vapor ejercida por el agua que contiene el sólido (que depende del tiempo del material y de su contenido de humedad) y la presión parcial del vapor de la corriente gaseosa [6]. El aire es el agente secante más utilizado para procesar biomasa, la circulación del agente secante es un factor que afecta a la velocidad de evaporación del agua principalmente durante las primeras etapas del proceso de secado de una partícula. Cuanto mayor sea la velocidad del agente secante, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo requerido en el secado. El espesor de la capa límite que existe entre el sólido y el agente secante regula la velocidad de remoción de la humedad, siendo esta mayor cuanto menor sea el espesor de esta capa. El modo en el que se desarrolle la corriente del agente secante también es un factor a tener en cuenta, siendo más eficaz un flujo turbulento que uno laminar cuando se persigue un proceso de secado más rápido [7].

2.2. ANTECEDENTES

Las recientes investigaciones en secado de biomasa a nivel nacional e internacional, muestran el impacto del proceso de secado de materiales agrícolas como mejoramiento de la eficiencia en múltiples campos, como lo es el incremento en resistencia mecánica en materiales de construcción y aprovechamiento de energía con la quema de material sólido, estos estudios se hacen de dos formas, la primera mediante estudios experimentales, obteniendo lecturas de las variables físicas en el proceso y como segunda por medio de modelos matemáticos, que generan solución numérica resueltas en herramientas computacionales.

S.AZZOUZ [8]. Evaluó de forma experimental la cinética del secado en productos agrícolas con el fin de obtener coeficientes difusivos en función del proceso de

secado, el estudio se realizó para un material biomásico en específico, la uva, determinando los modelos de difusividad efectiva basados en la ley de Fick.

A.RUIZ CELMA [9]. Desarrollo de forma experimental un proceso de secado por infrarrojos de la cascara de oliva, investigando experimentalmente en dos intervalos de temperaturas, encontrando que a mayor temperatura aumenta la velocidad del secado obteniendo como resultado curvas con respecto a la humedad, el ahorro en tiempo de secado para retirar humedad de la biomasa hasta su base seca, y el cálculo de la energía de activación de difusión.

T.BARZANAS [10]. Evaluó el proceso de secado de hierba cosechada, utilizando dos enfoques, primero de forma experimental tomando como variables las condiciones climáticas externas, obteniendo los modelos analíticos con base a la ecuación de Penman, y segundo mediante una modelación en CFD a partir de los modelos analíticos antes mencionados, obteniendo una buena correspondencia entre los dos enfoques.

L.FAGERNÄS [11]. Estudio la importancia del secado como pre tratamiento de la biomasa para la producción de combustibles sintéticos, tomando como base el proceso de secado que actualmente es usado por la industria, selecciono dos tipos de procesos de secado, los cuales son el proceso de transporte secador de vapor neumático y aprovechamiento de los gases de combustión como medio de secado en un secador rotatorio.

J.F.GONZALES [12]. Realizo una investigación teórica y experimental de un proceso de secado de biomasa a partir de los gases de combustión producto de la quema para calefacción domestica de un conjunto de tipos de biomosas, como resultado establece cuál de los combustibles biomasicos como pino, peral, presentan mejor rendimiento en cuanto a combustión y a rendimiento en proceso de secado para la caña común.

DENGYU CHEN [13]. En su estudio presenta un método termo gravimétrico para determinar la difusividad efectiva contra la humedad y la cinética del secado en la biomasa, haciendo experimentos sobre aserrín de álamo a cuatro temperaturas definidas, en sus resultados muestra los coeficientes de difusividad y su energía de activación.

TESFALDET GEBREEGZIABHER [14]. Estudió el proceso de secado de biomasa para aumentar la eficiencia de combustión, reducción de contaminación y mejorar el proceso, para ello utiliza un modelo matemático que incorpora balances de masa y energía, transferencia de calor y la cinética del secado para determinar el nivel óptimo en el secado de la biomasa enfocada en virutas de madera.

2.3. MARCO TEÓRICO

2.3.1. Características físico químicas de la cascarilla de arroz

Como biomasa empleada en el estudio para la caracterización de la cinética del secado, se implementó la cascarilla de arroz por ser un material residuo del cultivo del cereal grano de arroz, siendo el segundo cereal más producido a nivel mundial después del maíz, obteniendo de la producción de grano de arroz a nivel nacional el 20% de este en cascarilla de arroz, haciéndolo un material aprovechable por su venta de bajo costo.

Figura 2. Cascarilla de Arroz.



La cascarilla de arroz presenta características fisicoquímicas que le dan un buen rendimiento como material combustible. En la siguiente tabla se muestran los resultados del estudio de análisis último a una muestra de cascarilla de arroz del territorio colombiano.

Tabla 2. Análisis Próximo de la cascarilla de arroz en Colombia.

Elemento	%
Carbono fijo	16,67
Cenizas	17,89
Volátiles	65,47

Fuente: V. Agustín, S. Bienvenido y M. José P., «Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz,» *Scientia Et Technic*.

Mostrando que por la norma ASTM D3175 e ISO 562 los materiales volátiles al ser de porcentaje alto hacen que el material combustione con mayor facilidad y con un tamaño de llama larga, también incide en el nivel de pulverización del material siendo este no requerido para el procesamiento de la cascarilla de arroz como material combustible. El carbono fijo por la norma ASTM D3172 representa la quema de material en estado sólido y utilizado para calcular la eficiencia de la combustión. Las cenizas por la norma ASTM D3174 e ISO 1171 muestran que a menores porcentajes menor nivel de suciedad reduciendo el costo de procesos y aumentando la disponibilidad de los equipos.

Entre las características fisicoquímicas la considerada como la más importante para materiales de combustión es el análisis elemental que representa el contenido en porcentajes de los elementos carbono C, hidrogeno H, nitrógeno N, oxígeno O, azufre S, humedad y cenizas de la muestra del material. Al trabajar con materiales biomásicos que poseen contenido de humedad distintos se obtienen diferencias en el análisis elemental como se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes % de humedad en Colombia.

Cascarilla de arroz						
Humedad	C	H	O	N	S	Cenizas
8,6	42,5	6,0	36,2	0,21	0,49	14,6
8,9	39,1	5,2	37,2	0,27	0,43	17,8
9,4	33,4	4,3	38,5	0,38	0,32	23,1

Fuente: V. Agustín, S. Bienvenido y M. José P., «Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz,» *Scientia Et Technic*.

La tabla anterior muestra que el contenido de azufre que tiene la muestra de la cascarilla de arroz es un porcentaje bajo, provocando así que en su quema las

emisiones sean más puras, aumentando la durabilidad de equipos de recuperación de calor y permitiendo recuperar hasta temperaturas más bajas de salida para aumentar la eficiencia en las calderas.

Lamentablemente el contenido en porcentaje de humedad reduce el poder calorífico que representa la energía disponible en la combustión siendo este el factor más importante para el diseño de la cámara de combustión en la caldera y el que permite calcular la cantidad de material en masa que debe ser quemado para satisfacer la demanda de energía.

2.3.2. Transferencia de masa

Los procesos de transferencia de masa se dan donde las operaciones cambian la composición de las soluciones, y se caracterizan por transferir una sustancia a través de otra en escala molecular, a este fenómeno se le conoce como difusión. El movimiento de las moléculas en la transferencia de masa se da de forma diferente al comportamiento de los fluidos por diferencia de presión o por cambios de temperatura, la transferencia de masa se da por gradientes de concentración o diferencias de concentración siendo esta la predominante en el proceso difundiendo las moléculas de mayor concentración a menor concentración hasta un estado de equilibrio [15].

2.3.3. Clasificación de las operaciones de transferencia de masa.

Entre las operaciones de transferencia de masa existen clasificaciones de procesos, por ello a continuación se definirán tres grupos de procesos *Contacto directo de dos fases inmiscibles*, *Fases separadas por una membrana*, *Contacto directo de fases miscibles*, entre los cuales se identifica la clasificación de *Contacto directo de dos fases inmiscibles* como la categoría que compete al desarrollo de esta investigación.

2.3.4. Contacto directo de dos fases inmiscibles

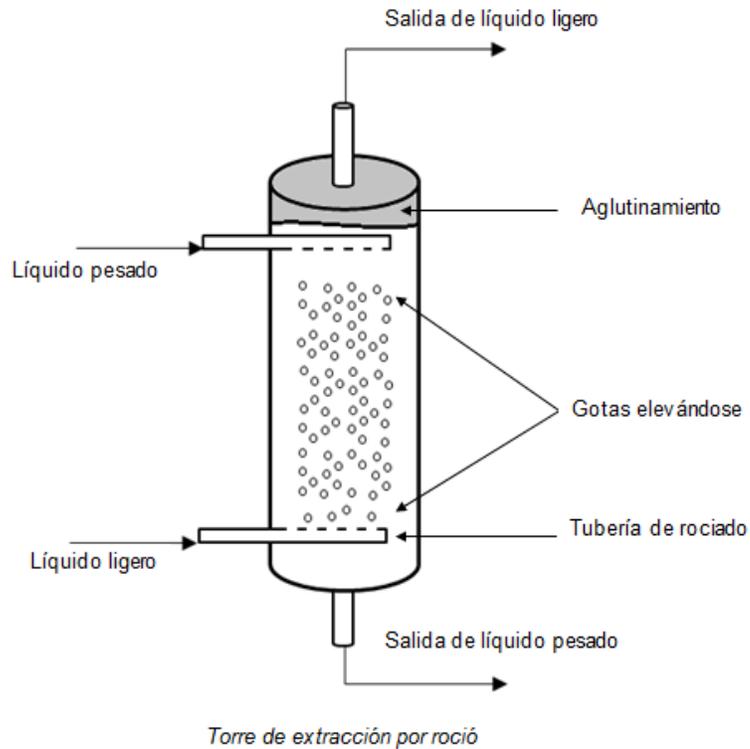
En esta operación los diversos componentes en las sustancias están distribuidos de forma distinta entre las fases, lo que conlleva que al realizarse este tipo de transferencia de masa se obtenga como resultado en la mayoría de los casos entre uno de los componentes, una sustancia pura alcanzada por el equilibrio de esta en la naturaleza, destacando que ninguna de las fases en equilibrio en la naturaleza consta de solo un elemento y que nunca se conseguirá una separación total pero si una separación parcial de tanto como se desee del componente final.

Los estados de agregación de la materia permiten un total de seis posibilidades de interacción entre las fases, (líquido-líquido, líquido-sólido, líquido-gas, sólido-gas, sólido-sólido, gas-gas), los cuales se explicaran uno a uno a continuación.

2.3.4.1. Contacto entre fases Líquido – Líquido

La transferencia de masa para sustancias inmiscibles que se da de líquido a líquido se divide en dos operaciones que son *extracción líquida* y *extracción fraccionada* siendo la primera la separación que se obtiene del contacto de dos fases líquidas insolubles. La segunda, parte del contacto entre sustancias con distintos componentes en contacto con una fase insoluble, obteniendo así en el resultado una concentración de esta en distintas proporciones en las dos fases líquidas.

Figura 3. Esquema de transferencia de masa Líquido – Líquido.

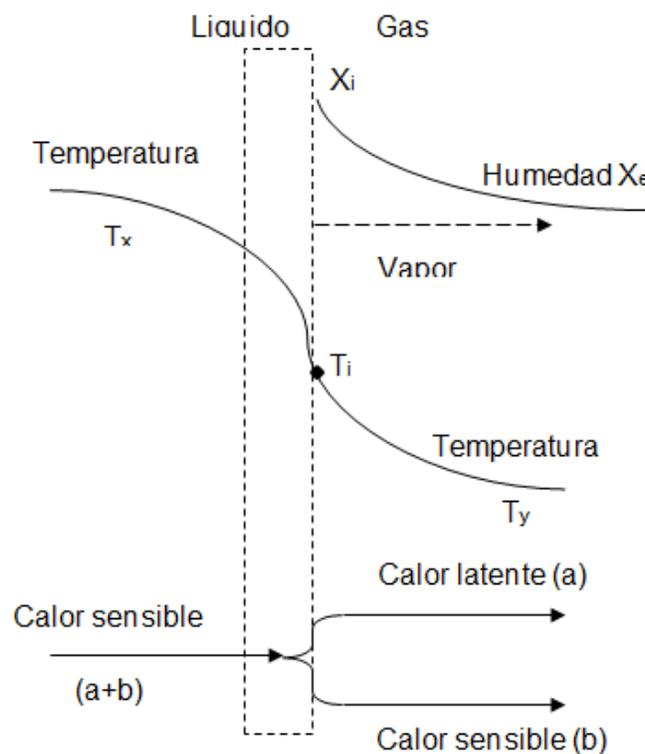


2.3.4.2. Contacto entre fases Líquido-Gas

En este tipo de transferencia de masa se presentan tres operaciones *destilación fraccionada, absorción de gases, desorción, humidificación o des humidificación*. La destilación fraccionada ocurre cuando la fase líquida es sometida a un calor que incrementa su temperatura haciendo que esta forme la fase gaseosa o en caso contrario que la fase gaseosa este sometida a pérdida de calor disminuyendo su temperatura obteniéndose una fase líquida. La absorción de gases se presenta cuando una de las fases o ambas fases son soluciones en mezcla, haciendo que uno de los componentes de la mezcla en la fase gaseosa la abandone y se mezcle en la solución de fase líquida, o en el caso inverso que uno de los componentes de la solución en mezcla de la fase líquida la abandone mezclándose en la solución de la fase gaseosa esto se conoce como desorción. La humidificación y des

humidificación se da cuando en la fase líquida solo posee un único componente en este caso agua líquida y la fase gaseosa puede poseer uno o más componentes en su mezcla, cuando parte del líquido por evaporación abandona la fase líquida mezclándose en la fase gaseosa se conoce como humidificación en caso contrario cuando vapor de agua contenido en la fase gaseosa hace contacto con la fase líquida perdiendo temperatura cambia a fase líquida siendo esta la deshumidificación.

Figura 4. Esquema de la Operación de humidificación.



2.3.4.3. Contacto entre fases Gas-Gas

Esta operación prácticamente no se realiza por causa de la solubilidad de los gases una fase gaseosa en contacto con otra fase gaseosa son solubles entre si llegando rápidamente a un equilibrio en concentraciones.

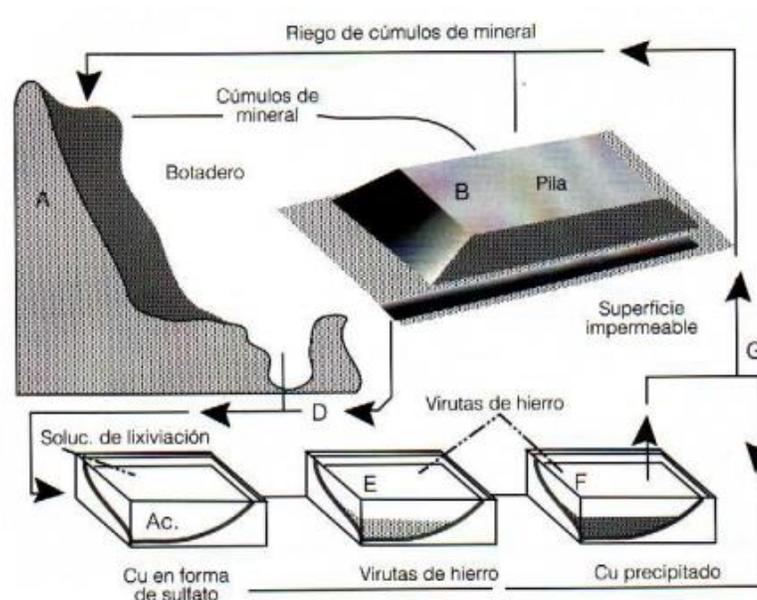
2.3.4.4. Contacto entre fases Sólido-Sólido

Esta categoría no es usada industrialmente por presentar en su operación de transferencia de masa una extremadamente lenta velocidad de difusión.

2.3.4.5. Contacto entre fases Líquido- Sólido

En esta categoría de transferencia de masa son conocidas dos operaciones, Cristalización fraccionada y lixiviación. La primera se identifica cuando todos los componentes de las soluciones de las fases están presentes en sus estados finales de equilibrio. La lixiviación guarda similitud con la desorción mencionado en la transferencia líquido – gas, siendo ahora la fase solida una solución que tiene un único componente en común con la fase liquida el cual en contacto entre fases se difunde selectivamente, cabe resaltar que en la lixiviación el sólido es quien se difunde en el líquido.

Figura 5. Esquema de una operación por lixiviación.

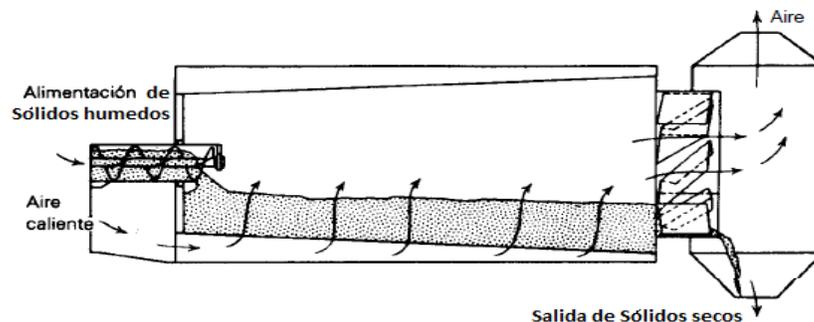


Fuente: Creces Educación – www.creces.cl

2.3.4.6. Contacto entre fases Sólido-Gas

En esta clasificación de transferencia de masa existe un conjunto de operaciones así como en las clasificaciones pasadas, y estas corresponden a las operaciones de *sublimación fraccionada*, *absorción fraccionada*, *secado* y *desorción*. Definiendo cada una de estas operaciones se da comienzo a la sublimación fraccionada que se da cuando se transforma parcialmente una solución de fase sólida a fase gaseosa sin antes pasar por una fase líquida, lo que da como resultado fracciones parciales en fase sólida y fase gaseosa con los mismos componentes iniciales del proceso. La absorción fraccionada es una operación que corresponde a la difusión de un componente o varios de una solución de fase gaseosa en un sólido, fraccionando así un componente de la fase gaseosa hacia la fase sólida obteniendo separaciones selectivas dependiendo de las características de las soluciones sólidas a implementar. El *secado* y *desorción* siendo el primero la operación que representa la investigación de este trabajo al contener los elementos distintivos que la representan, se da cuando la fase sólida se encuentra humedecida por un líquido volátil que al estar en contacto con una fase gaseosa seca, esta humedad es arrastrada abandonando la fase sólida hacia la fase gaseosa nombrándola como agente secante.

Figura 6. Cámara secadora de sólidos.



Fuente: R. E. Treybal, OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA, Mc Graw Hill.

2.3.5. Difusión en la transferencia de masa

La difusión molecular es un proceso de transporte que se efectúa con parámetros de distancia para tiempos determinados, siendo estos tiempos extensos para difusiones naturales cuando se dan tanto en fases sólidas y fases líquidas pero cortos cuando se presentan en fases gaseosas por ser estas solubles entre ellas, fenómenos que son descritos por la primera Ley de Fick de difusión de masa y la segunda Ley de Fick de difusión de masa, por otra parte se encuentra el término de advección que se da cuando de manera forzada se provoca el movimiento de un flujo de fluido transportando masa de un punto a otro, este término guarda similitud con el comportamiento de la convección forzada de los mecanismos de transferencia de calor o Ley de Enfriamiento de Newton. Para un mejor entendimiento de la difusión molecular se identifican los siguientes criterios [16]:

- ✓ Debido a la energía térmica de las sustancias es provocado el movimiento molecular individual de las mismas, descrito por la teoría cinética de los gases [15].
- ✓ La concentración de una sustancia no es la fuerza motriz real para realizar la difusión, esta se da por el potencial o actividad químico [15].
- ✓ Si una solución es completamente uniforme con respecto la concentración de sus componentes, no ocurre ninguna alteración [15].
- ✓ Si una solución no es uniforme con respecto a su concentración, la solución alcanzara espontáneamente la uniformidad por difusión, esto por la diferencia de gradientes de concentración moviéndose de mayor concentración a menor [15].

Como antes se ha mencionado la difusión se presenta en las tres fases gaseosa, líquida y sólida, por lo tanto para hacer buen uso de estas operaciones de transferencia de masa se deben identificar las fases en las cuales se realiza el proceso. Para el proceso de secado de biomasa se describe como la desorción por medio de difusión de la humedad en el interior de un sólido poroso hacia un agente secante gaseoso, lo que indica que se presenta el contacto entre las tres fases en el transcurso del proceso de transferencia de masa, por ello se describen a continuación los tipos de difusión entre las fases de líquido sólido y gas.

Para describir los componentes de difusión en las operaciones se parte de la primera Ley de Fick de difusión de masa en la que describe la velocidad con la que un flujo molar se transporta por un área en un tiempo determinado, lo que indica que las moléculas son difundidas por una diferencia o gradiente de concentración a través de una solución de una fase a otra.

Primera Ley de Fick:

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

En la anterior ecuación es simplificado el transporte de masa a una sola dimensión y el signo negativo indica el sentido del transporte, de una mayor concentración a una menor concentración.

Donde.

j : Flux de rapidez de transferencia de masa $\frac{\text{moles}}{\text{m}^2 \text{ s}}$

D : Coeficiente de difusión de masa $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

C : Concentración de la sustancia $\frac{\text{moles}}{\text{m}^3}$

x : Dimensión en la que se hace el transporte de masa m

Para una mezcla binaria la ecuación anterior estará representada de un componente con concentración C_A hacia un componente de concentración C_B . Para fines de relación se define en la fase un componente fijo y otro en relación al fijo por ello se indicara con la letra N al movimiento del componente con relación a un punto fijo en el espacio y j al movimiento de un componente en relación a los demás.

Si se define un punto fijo entre la interface de contacto de dos soluciones nombradas como A y B, entonces el movimiento del flux de cada componente de N_A y N_B estarán dirigidos a través de una dimensión por un gradiente de concentración, teniendo como resultado que la cantidad de movimiento total esté representada por.

$$N = N_A + N_B \quad (2)$$

Por lo tanto para cada fracción de componente de A nombrado por x_A que se difunde en el flujo N_A se obtiene.

$$N_A = Nx_A + j_A \quad (3)$$

De igual forma para B.

$$N_B = Nx_B + j_B \quad (4)$$

De este modo se obtiene.

$$N_A = (N_A + N_B) \frac{C_A}{C} - D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (5)$$

$$N_B = (N_B + N_A) \frac{C_B}{C} - D_{BA} \frac{\partial C_B}{\partial x} \quad (6)$$

Lo que muestra que al solo considerarse la difusión en una dimensión se demuestra que el coeficiente de transferencia de masa de A hacia B es el mismo de B hacia A. Para ello se suman las ecuaciones (5) y (6).

$$-D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} = D_{BA} \frac{\partial C_B}{\partial x} \quad (7)$$

Al tomar de forma general y no solo en una dimensión las ecuaciones de difusión se obtiene la ecuación de continuidad.

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Donde.

ρ : Es la densidad de la sustancia $\frac{kg}{m^3}$

u : Es la velocidad de movimiento de masa $\frac{kg}{s}$

t : Es el tiempo s

Si el comportamiento de la sustancia es a densidad constante entonces la ecuación (8) se reduce a.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Para el caso de difusión molecular en estado transitorio se emplea la segunda Ley de Fick de difusión representada como.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Y para condiciones generales en el que no solo se considere una dimensión la ecuación (10) se transforma en.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

2.3.5.1. Difusión de masa en líquidos

La difusión de líquidos tiene las mismas unidades dimensionales de la difusión en gases y sólidos es decir unidades de longitud al cuadrado sobre tiempo, pero esto no indica que su comportamiento sea el mismo puesto que en los líquidos la difusión se da a una velocidad de flujo molar más lenta que en los gases por tener sus moléculas cercanas entre sí, al no tener una teoría concreta como la *teoría cinética de los gases*. Por ello R. E. Treybal [15] recomienda el uso de las ecuaciones de Wilke y Chang:

$$D_{AB} = \frac{(117.3 \cdot 10^{-18})(\varphi M_B)^{0.5} T}{\mu v_A^{0.6}} \quad (12)$$

Donde.

D_{AB} : Difusividad de A en una solución diluida en el solvente B $\frac{m^2}{s}$

M_B : Peso molecular del solvente $\frac{kg}{mol}$

T : La temperatura K

μ : Viscosidad de la solución $\frac{kg}{m \cdot s}$

v_A : Volumen molar del soluto en el punto de ebullición normal $\frac{m^3}{kmol}$

φ : Factor de asociación para el disolvente

Tabla 4. Factor de asociación para disolventes.

ϕ	
Para el agua como disolvente	2,26
Para el metanol como disolvente	1,9
Para el etanol como disolvente	1,5
Para disolventes no asociados	1,0

Fuente: R. E. Treybal, Operaciones De Transferencia De Masa, Mc Graw Hill.

2.3.5.2. Difusión de masa en gases

La difusión de masa en los gases es definida por la teoría cinética de los gases como se mencionó anteriormente, y al igual que en la difusión en los líquidos se representa en dimensiones de longitud al cuadrado sobre tiempo, para esta operación se recomienda las ecuaciones de Wilke-Lee del método de Hirschfelder-Bird-Spotz [15].

$$D_{AB} = \frac{10^{-4} \left(1.084 - 0.249 \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \right) T^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P_t (r_{AB})^2 f \left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}} \right)} \quad (13)$$

Donde.

D_{AB} : Difusividad de A a B $\frac{m^2}{s}$

M_A : Peso molecular A $\frac{kg}{mol}$

M_B : Peso molecular B $\frac{kg}{mol}$

T : Temperatura K

P_t : Presión absoluta $\frac{N}{m^2}$

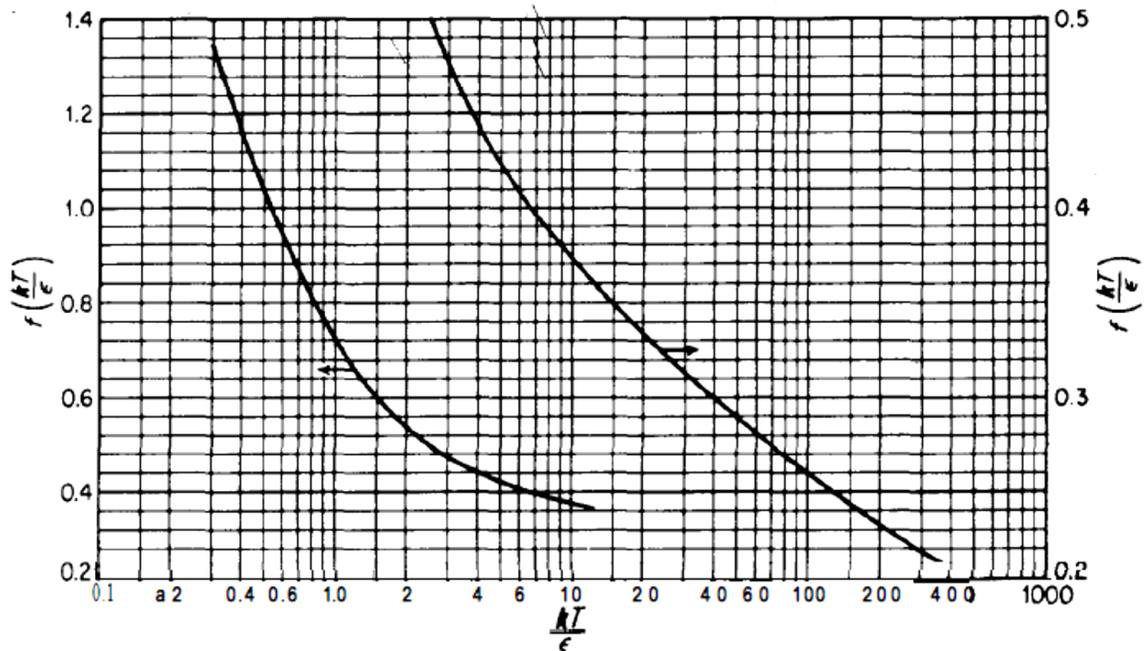
ε_{AB} : Energía de atracción molecular

r_{AB} : Separación molecular durante el choque nm

k : Constante de Boltzmann

$f\left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}}\right)$: Función de choque molecular representada en la figura 7

Figura 7. Función de choque molecular.



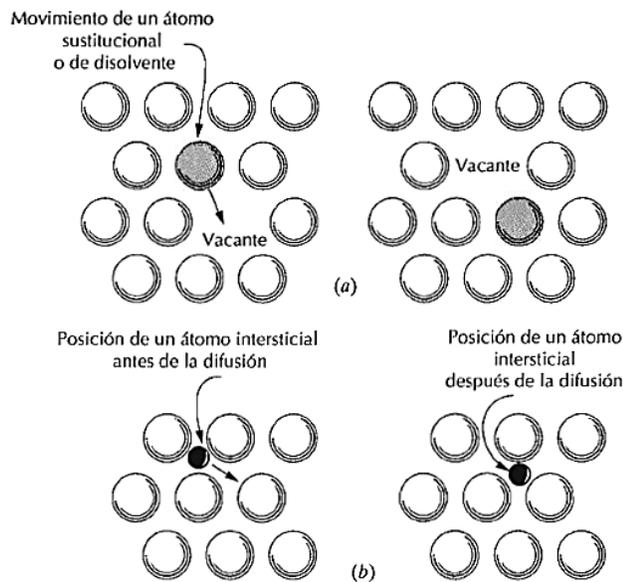
Fuente: R. E. Treybal, Operaciones De Transferencia De Masa, Mc Graw Hill.

2.3.5.3. Difusión de masa en Sólidos

Dado que la difusión se da por el movimiento de átomos al presentarse diferencia en la concentración de una sustancia con respecto a otra y que este movimiento se realiza en un tiempo determinado. Al comparar la transferencia de materia por difusión de sólido con respecto a las fases líquida y gaseosa, este tiempo de movimiento de masa sería el más extenso entre operaciones de difusión lo que hace que la difusión de masa en sólidos por medio natural a condiciones ambientales sea operativamente no sustentable, lo que conlleva a realizar esta práctica por medio

de activación energética al suministrar una carga térmica ocasionando por vibración térmica el movimiento de átomos a través del cuerpo sólido. Práctica que es comúnmente realizada para metales y aleaciones en los cuales se conocen dos mecanismos de difusión en sólido que son *difusión por vacante* y *difusión intersticial*.

Figura 8. Representación de los mecanismos: a) difusión por vacante y b) difusión intersticial.



Fuente: J. William D. Callister, Ciencia e ingeniería de los materiales, Barcelona: REVERTÉ S. A.

Ajustando los términos de la ecuación en una sola dimensión de la segunda Ley de Fick Ec. (10) para la difusión de masa en el interior de un sólido se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{c_x - c_0}{c_s - c_0} = 1 - \text{ferr} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (14)$$

Donde.

C_x : Concentración de la sustancia que se difunde en el interior del solido $\frac{\text{moles}}{\text{m}^3}$

C_s : Concentración de la sustancia que se difunde en la superficie del cuerpo solido $\frac{\text{moles}}{\text{m}^3}$

C_0 : Concentración inicial de la sustancia en el interior del cuerpo solido $\frac{\text{moles}}{\text{m}^3}$

$ferr\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$: Expresión nombrada como función de error en la difusión en solidos

Tabla 5.

D : Coeficiente de difusión de masa $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

x : Dimensión en la que se hace el transporte de masa m

t : Es el tiempo s

Tabla 5. Función de error.

Tabulación de la función de error	
z	$ferr(z)$
0	0
0,025	0,0282
0,05	0,0564
0,15	0,1680
0,20	0,2227
0,25	0,2763
0,30	0,3286
0,35	0,3794
0,40	0,4284
0,45	0,4755
0,50	0,5205

Fuente: J. William D. Callister, Ciencia e ingeniería de los materiales, Barcelona: REVERTÉ S. A.

Dado que la difusión en sólidos es practicada por medio de activación energética incrementando la temperatura para generar un mayor movimiento de átomos se emplea la siguiente ecuación.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (15)$$

Donde.

D : Coeficiente de difusión de masa $\frac{m^2}{s}$

D_0 : Coeficiente de difusión de masa independiente de la temperatura $\frac{m^2}{s}$

Q : Energía de activación para la difusión $\frac{j}{moles}$

R : Constante de los gases $\frac{j}{moles K}$

T : Temperatura en unidades absolutas K

2.3.6. Secado de sólidos

El proceso de secado se encuentra en la clasificación de contacto directo de fases inmiscibles sólido – gas como se explicó con anterioridad, y se destaca por ser un proceso de eliminación de humedad que se presenta en fase líquida en el interior del sólido. En este proceso intervienen varios mecanismos que operan de forma simultánea como lo son los mecanismos de transferencia de calor y los mecanismos de transferencia de masa, los cuales para términos de cinética del secado son predominantes para la velocidad de secado.

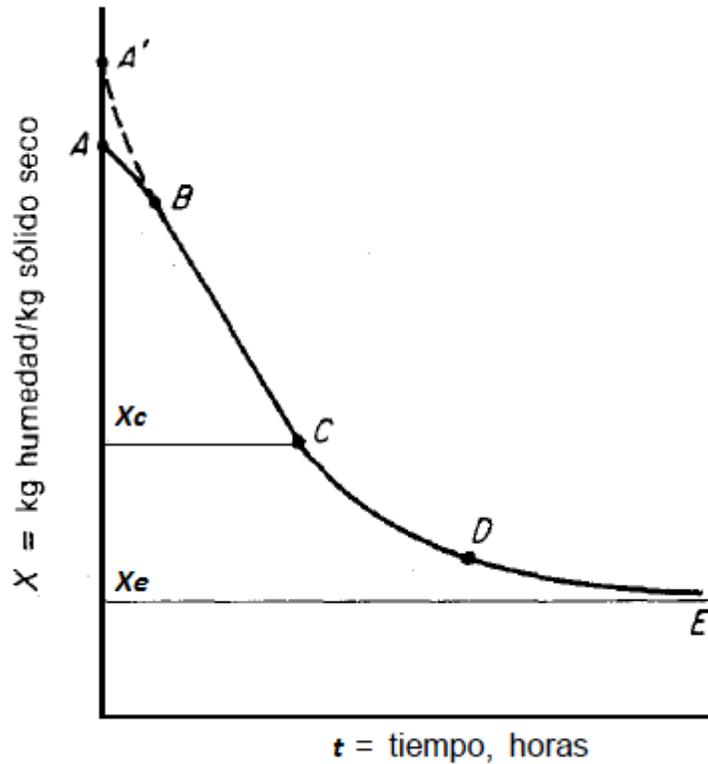
La eliminación de humedad como resultado de la iteración simultánea de los mecanismos de transferencia de calor y de masa, para un tipo de secado por agente secante depende de las *condiciones externas* del proceso como lo son velocidades de flujo, temperatura del flujo, área de contacto del flujo, condiciones de presión en

que se opera, gobernadas por el mecanismo de transferencia de calor por convección que se encuentra en contacto en primera instancia con una película húmeda en la superficie del sólido, siendo esta removida provocando el movimiento de gradientes de humedad desde el interior del sólido conocida como *condiciones internas* del proceso. Donde operan de forma simultánea la transferencia de calor por conducción y movimiento de masa por difusión molecular [17].

2.3.6.1. Velocidad del secado

Con el fin de obtener el tiempo de equilibrio en que se elimina el contenido de humedad de una muestra y las iteraciones de los factores que afectan la rapidez con la que se ejecuta el proceso es necesario conocer las características que gobiernan en la velocidad de secado, para ello a raíz de la experimentación de un secado ya sea continuo o por lote son identificados por medio de las curvas de secado los siguientes aspectos. El contenido de humedad se mide en unidades de masa de humedad sobre masa de sólido seco expresado por la letra X graficándose este contra el tiempo t en el que equilibra el contenido de humedad como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Curva de humedad de equilibrio.



Fuente: R. E. Treybal, Operaciones De Transferencia De Masa, Mc Graw Hill.

En la figura se muestra la curva característica de secado hasta humedad de equilibrio X_e de una muestra en la cual se destacan cuatro zonas AB, BC, CD, DE, que son de gran importancia para representarlas en términos de rapidez de secado o flux de secado por medio de la iteración del área de contacto A y los términos X y t , obteniéndose el flux o rapidez de secado N como se muestra en la ecuación (16).

$$N = -\frac{m_s}{A} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (16)$$

Donde.

N : Rapidez de secado o flux de secado $\frac{kg_{humedad}}{m^2 s}$

m_s : Masa del solido seco $kg_{solido seco}$

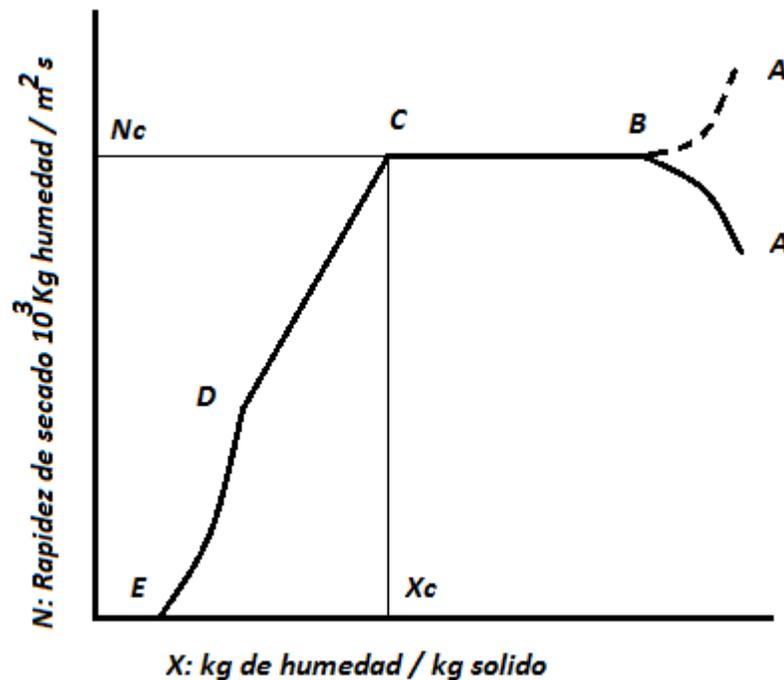
X : Contenido de humedad $\frac{kg_{humedad}}{kg_{solido seco}}$

t : Tiempo de secado s

A : Área de contacto con el agente secante m^2

El signo negativo de la ecuación (16) indica la eliminación del contenido de humedad en las muestras, y representando esta expresión contra el contenido de humedad se obtiene la curva que relaciona los términos de rapidez de secado mostrados en la figura 10.

Figura 10. Rapidez de secado.



Destacando las cuatro zonas antes mencionadas en la figura 9, se identifican como AB zona del ajuste inicial en esta el contenido de humedad cambia con mayor rapidez siendo la humedad que se encuentra en la película que recubre al sólido, zona BC que representa el periodo de rapidez constante N_c hasta el punto de contenido de humedad crítico X_c , zona CD periodo inicial de rapidez decreciente de secado, en esta etapa la película que cubre al sólido no se ha evaporado en su totalidad, zona DE segundo periodo del periodo de velocidad decreciente hasta la humedad de equilibrio de la muestra.

De la ecuación (16) se obtiene la expresión analítica para el cálculo del tiempo de secado en el periodo de rapidez constante.

$$t = \int_0^t \partial t = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{\partial X}{N_c} \quad (17)$$

Para el tiempo en el periodo de rapidez decreciente se opta por tomar este periodo como una línea recta e implementar la ecuación de la pendiente.

$$N = Xm + b \quad (18)$$

Reajustándose con la ecuación (17)

$$t = \int_0^t \partial t = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{\partial X}{Xm+b} = \frac{m_s}{mA} \ln \frac{mX_1+b}{mX_2+b} \quad (19)$$

2.3.6.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad referenciado por la variable X como se mencionó en los términos de velocidad de secado define la cantidad de masa húmeda que posee una muestra de masa seca, medida en unidades de $\frac{kg_{humedad}}{kg_{sólido\ seco}}$ o cantidad de masa

húmeda que posee un sólido húmedo con unidades de $\frac{kg_{humedad}}{kg_{sólido húmedo}}$ para fines prácticos se identifican estas relaciones como contenido de humedad en base seca X_{bs} y contenido de humedad en base húmeda X_{bh} respectivamente. Ambas expresiones se describen en las siguientes ecuaciones.

$$X_{bs} = \frac{m_{humedad}}{m_{sólido seco}} \quad (20)$$

$$X_{bh} = \frac{m_{humedad}}{m_{sólido seco} + m_{humedad}} = \frac{m_{humedad}}{m_{sólido húmedo}} \quad (21)$$

Donde.

X_{bs} : Contenido de humedad en base seca $\frac{kg_{humedad}}{kg_{sólido seco}}$

X_{bh} : Contenido de humedad en base húmeda $\frac{kg_{humedad}}{kg_{sólido húmedo}}$

$m_{humedad}$: Masa de la humedad contenida en el sólido $m_{humedad}$

$m_{sólido seco}$: Masa del sólido sin presencia de humedad $m_{sólido seco}$

$m_{humedad}$: Masa del sólido con presencia de humedad o masa total de la muestra sin secar $kg_{sólido húmedo}$

En la práctica para las operaciones de secado es empleado el cálculo del contenido de humedad en base seca haciendo esta de manera más rápida la obtención de los valores de equilibrio como lo son la humedad de equilibrio X_e y el tiempo de equilibrio t_e

2.3.6.3. Humedad de equilibrio

El termino humedad de equilibrio X_e define la máxima cantidad de humedad retirada de una muestra que fue tratada a determinadas condiciones ambientales y de proceso de secado, también definida como la humedad en equilibrio de una sustancia a una presión parcial dada del vapor, siendo los factores como humedad relativa y energía suministrada determinantes a la hora de mantener este equilibrio, cabe destacar que al presentarse un cambio en las condiciones de proceso y de entorno afecta directamente a la humedad de equilibrio.

La cantidad de humedad de equilibrio está directamente relacionada con el tiempo de equilibrio t_e en el secado de una muestra, obteniéndose de manera experimental al hacer tratamientos a determinadas muestras obteniendo modelos matemáticos en relación a los factores en los que se realizan los tratamientos, siendo estos diferentes para cada para cada material biomásico a estudiar. A continuación se representan modelos matemáticos de diversos autores para materiales biomásicos en específicos [18, 19, 20, 21].

Ecuación de Chen-Clayton.

$$Hr = \exp \left[-\frac{C_1}{T_k^{C_2}} \exp(-C_3 T_k^{C_4} M) \right] \quad (22)$$

Ecuación de Chung-Pfost Modificada.

$$Hr = \exp \left[-\frac{C_1}{T+C_2} \exp(-C_3 M) \right] \quad (23)$$

Ecuación de Halsey Modificada.

$$Hr = \exp[-\exp(C_1 + C_2 T)M^{-C_3}] \quad (24)$$

Ecuación de Henderson Modificada.

$$Hr = 1 - \exp[-C_1(T + C_2)M^{C_3}] \quad (25)$$

Ecuación de Oswin Modificada.

$$Hr = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_1 + C_2 T}{M}\right)^{C_3}} \quad (26)$$

Ecuación de Strohman-Yoerger.

$$Hr = \exp[C_1 \exp(-C_2 M) \ln P_s - C_3 \exp(-C_4 M)] \quad (27)$$

Donde.

Hr : Humedad relativa

T : Temperatura de secado $^{\circ} C$

T_k : Temperatura de secado en unidades absolutas K

M : Contenido de humedad en base seca $\frac{kg_{humedad}}{kg_{solido\ seco}}$

P_s : Presión de saturación del vapor Pa

C_1, C_2, C_3, C_4 : Coeficientes en las ecuaciones, ver tabla 6.

Tabla 6. Coeficientes de ecuación Henderson modificada, para diversos productos.

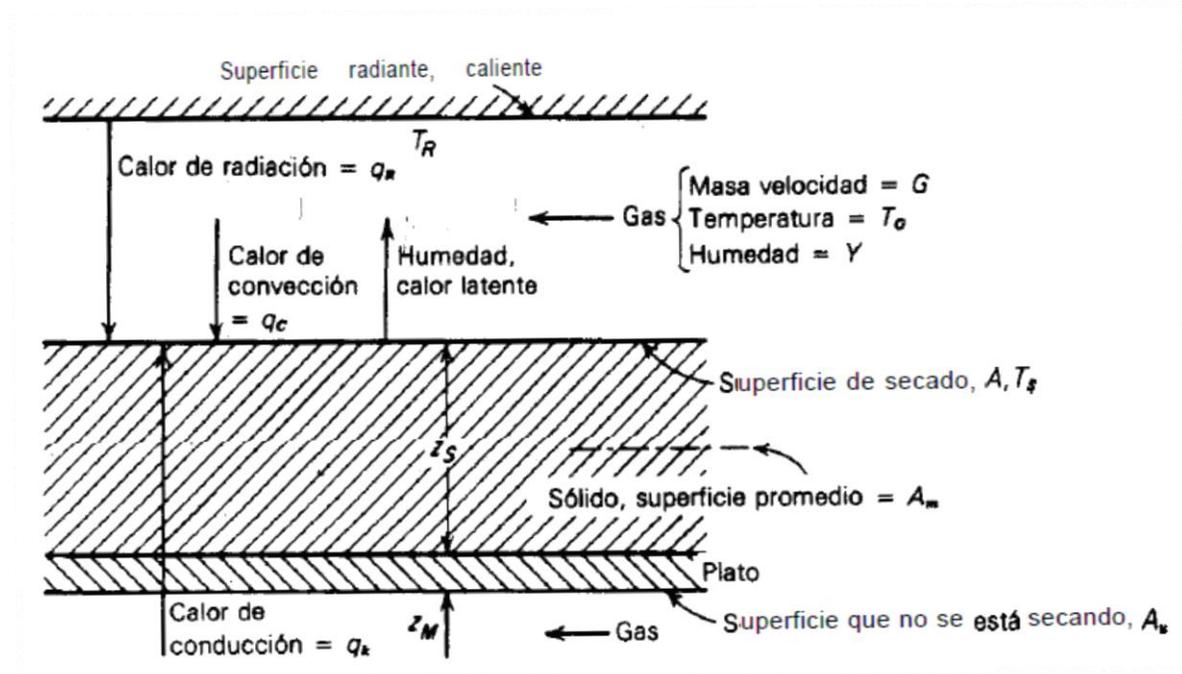
PRODUCTO	C_1	C_2	C_3
	$2,2919 \times 10^{-5}$	195,267	2,0123
	2,0899	254,23	1,8812
	8,6541	49,810	1,8634
	6,6587	23,318	2,5362
	1,9187	51,161	2,4451
	0,8532	113,725	2,4757
	0,2892	64,3551	1,7267
	4,1942	0,0	2,7296
	30,5327	134,136	1,2164

Fuente: A. S. D245.5, Moisture relationships of plant-based agricultural products, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Michigan USA: ASAE, 2001.

2.3.6.4. Analogía entre la transferencia de calor y transferencia de masa

Como ha sido mencionado anteriormente en la velocidad de secado la transferencia de calor y transferencia de masa se dan de manera simultánea a lo largo del proceso de secado lo que facilita al estar ambos mecanismos de transferencia ligados a la misma operación llevar los términos de ambos mecanismos de uno al otro como manera de identificar las variables y el comportamiento energético y de transporte de masa.

Figura 11. Mecanismos de transferencia.



Fuente: R. E. Treybal, Operaciones De Transferencia De Masa, Mc Graw Hill.

En la ilustración se representan los mecanismos de transferencia de calor y de transferencia de masa empleados en el secado por medio de agente secante a una superficie determinada de una muestra con contenido de humedad, en el esquema se muestra el espesor de película de humedad que se encuentra entre la superficie inicial de contacto hasta la superficie del sólido, también conocida como la *humedad libre*, siendo esta retirada en un tiempo determinado de contacto con el agente secante, a continuación se describen ambos mecanismos y sus relaciones numéricas.

El efecto térmico en el proceso de secado se presenta por los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección, radiación), siendo la conducción y convección los mecanismos considerados en el presente estudio.

Los modelos matemáticos analíticos correspondientes al mecanismo de transferencia de calor por conducción para consideraciones geométricas rectangulares, son representados por la Ley de Fourier de transferencia de calor.

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (28)$$

El signo negativo hace referencia al sentido de la velocidad de transferencia de calor, siendo de temperaturas más elevadas a temperaturas inferiores.

Donde.

k : Coeficiente de conductividad térmica $\frac{W}{m K}$

A : Área transversal al flujo de calor m^2

Δx : Espesor recorrido por la velocidad de transferencia de calor m

ΔT : Diferencia de temperaturas entre espesores K

La transferencia de calor por conducción que se estudia en el proceso de secado se da en régimen transitorio, por este motivo se ajusta la ecuación (1) a las coordenadas espaciales obteniendo la ecuación de Fourier-Biot.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29)$$

Tomando la siguiente estructura para régimen transitorio.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (30)$$

Donde.

α : Coeficiente de difusividad térmica $\frac{m^2}{s}$

\dot{e}_{gen} : Velocidad de generación de calor por unidad de volumen $\frac{w}{m^3}$

∂t : Variación de tiempo s

En la tabla 7 se muestran los coeficientes de difusividad térmica, de conductividad térmica, calores específicos de varias biomásas entre otras propiedades.

Tabla 7. Propiedades térmicas de algunos alimentos.

Alimento	Contenido de agua, % (masa)	Temperatura, $T^{\circ}C$	Densidad, $\rho kg/m^3$	Conductividad térmica, $k W/m \cdot ^{\circ}C$	Difusividad térmica, $\alpha m^2/s$	Calor específico, c_p $kJ/kg \cdot K$
Frutas/Vegetales						
Manzana, jugo de	87	20	1 000	0.559	0.14×10^{-6}	3.86
Manzanas	85	8	840	0.418	0.13×10^{-6}	3.81
Manzanas secas	41.6	23	856	0.219	0.096×10^{-6}	2.72
Chabacanos secos	43.6	23	1 320	0.375	0.11×10^{-6}	2.77
Plátanos frescos	76	27	980	0.481	0.14×10^{-6}	3.59
Brócoli	—	-6	560	0.385	—	—
Moras frescas	92	0-30	1 050	0.545	0.13×10^{-6}	3.99
Higos	40.4	23	1 241	0.310	0.096×10^{-6}	2.69
Toronja, jugo de	89	20	1 000	0.567	0.14×10^{-6}	3.91
Duraznos	89	2-32	960	0.526	0.14×10^{-6}	3.91
Ciruelas	—	-16	610	0.247	—	—
Membrillos						
Papas	78	0-70	1 055	0.498	0.13×10^{-6}	3.64
Pasas	32	23	1 380	0.376	0.11×10^{-6}	2.48

Fuente: Y. A. CENGEL, Transferencia de Calor y masa, México D.F.: Mac Graw Hill, 2007.

Para el mecanismo de transferencia de calor por convección que se obtiene de la interacción de intercambio de calor entre el agente secante y la superficie de la sustancia a secar se emplea la Ley de enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q} = hA(T_0 - T_\infty) \quad (31)$$

Donde.

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\frac{W}{m^2 K}$

T_∞ : Temperatura del entorno K

Dado que la transferencia de calor por convección se da en una región asumida como plana se utilizan las siguientes correlaciones correspondientes a su régimen laminar y turbulento.

Régimen laminar:

$$Nu = \frac{hL}{K} = 0.664 Re_l^{0.5} Pr^{\frac{1}{3}} \quad Re_l < 5 * 10^5 \quad (32)$$

Régimen turbulento:

$$Nu = \frac{hL}{K} = 0.037 Re_l^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad 5 * 10^5 \leq Re_l \leq 10^7, 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad (33)$$

$$Re_l = \frac{\rho \dot{x} l}{\mu} = \frac{\dot{x} l}{\nu} \quad (34)$$

Donde.

Nu : Número de Nusselt (unidades adimensionales)

Re : Número de Reynolds (unidades adimensionales)

Pr : Número de Prandtl (unidades adimensionales)

ρ : Densidad de la sustancia $\frac{kg}{m^3}$

\dot{x} : Velocidad lineal del fluido $\frac{m}{s}$

μ : Viscosidad dinámica $\frac{kg}{m \cdot s}$

ν : Viscosidad cinemática $\frac{m^2}{s}$

A continuación se muestra en la tabla 8 las propiedades para el material empleado como agente secante el *Aire*.

Tabla 8. Propiedades del aire a 1 atm.

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241

Fuente: Y. A. CENGEL, Transferencia de Calor y masa, México D.F.: Mac Graw Hill, 2007.

Definidos los mecanismos de transferencia de calor se da paso a los mecanismos de transferencia de masa, ya que estos han sido indicados y representados en el contenido de Difusión en la transferencia de masa para las tres fases sólido-líquido

- gas. A continuación se representa la analogía entre transferencia de calor y de masa.

De la ecuación (1) nombrada como la primera Ley de Fick de difusión de masa representada en función al movimiento molecular se ajusta en términos de peso en masa y aspectos geométricos al igual que en los mecanismos de transferencia de calor obteniéndose la siguiente ecuación [22].

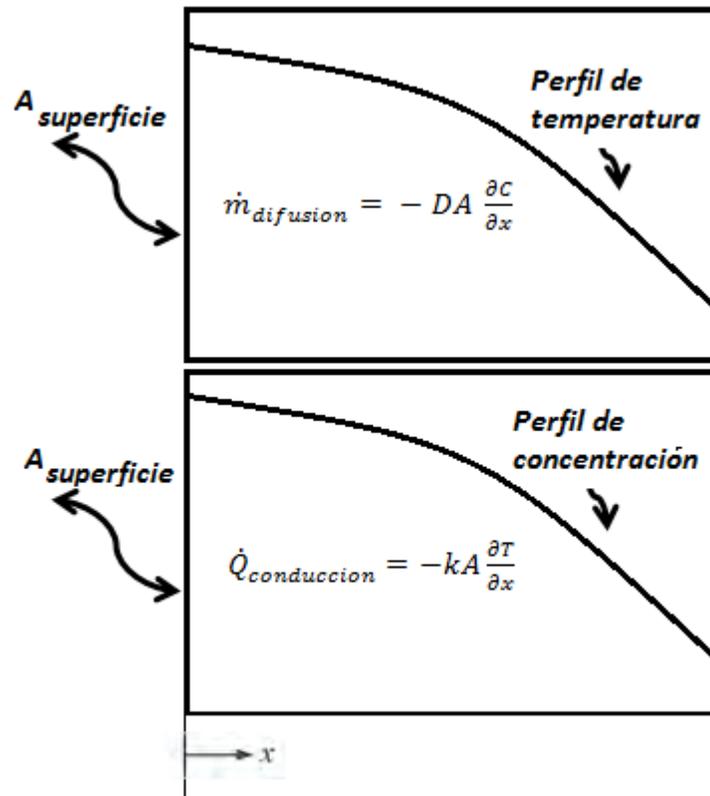
Primera ley de Fick.

$$\dot{m}_{difusion} = -DA \frac{\partial c}{\partial x} \quad (35)$$

Análoga a la Ley de Fourier de transferencia de calor.

$$\dot{Q}_{conduccion} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (36)$$

Figura 12. Analogía entre la Conducción de calor y la difusión de masa.



Fuente: Por el Autor.

Donde.

$\dot{m}_{difusion}$: Es la rapidez de masa por difusión $\frac{Kg}{s}$

$\dot{Q}_{conduccion}$: Es la velocidad de transferencia de calor por conducción w

D : Es el coeficiente de difusión de masa $\frac{m^2}{s}$

C : Es la concentración de la sustancia $\frac{kg}{m^3}$

x : Es la dimensión en la que se hace el transporte de masa y de calor m

A : Es el área superficial de contacto con el agente secante m^2

k : Es el coeficiente de conductividad térmica de la sustancia $\frac{w}{m K}$

ΔT : Es la diferencia de temperaturas entre espesores K

Lo anterior define la analogía entre los mecanismos internos de la sustancia de masa y de calor, por consiguiente a continuación se define la analogía de transferencia de masa y de calor externas es decir en el agente secante que ocurre por convección de calor y convección de masa.

De la ecuación de enfriamiento de newton definida como la ecuación de transferencia de calor por convección se hace la analogía al mecanismo de transferencia de masa por convección.

Transferencia de calor por convección.

$$\dot{Q}_{conveccion} = h_{calor}A(T_s - T_{\infty}) \quad (38)$$

Transferencia de masa por convección

$$\dot{m}_{conveccion} = h_{masa}A(C_s - C_{\infty}) \quad (38)$$

Donde.

$\dot{Q}_{conveccion}$: Velocidad de transferencia de calor por convección w

$\dot{m}_{conveccion}$: Rapidez de masa por difusión a convección $\frac{Kg}{s}$

h_{calor} : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\frac{w}{m^2 K}$

h_{masa} : Coeficiente de transferencia de masa por convección $\frac{m}{s}$

T_{∞} : Temperatura del agente secante K

T_s : Temperatura de superficie de contacto del agente secante con la sustancia K

C_∞ : Concentración de humedad del agente secante $\frac{kg}{m^3}$

C_s : Concentración de humedad de la superficie de contacto del agente secante con la sustancia $\frac{kg}{m^3}$

A : Área superficial de contacto con el agente secante m^2

2.3.6.5. Termodinámica de la Mezcla de gases.

Para el estudio de mezcla de gases en solución se hace necesario recordar los términos de conservación de masa de un compuesto en el que se indica que la fracción de masa en general de una molécula será igual a la unidad como su mayor fracción de masa, para ello como motivo de ejemplo se implementa una mezcla de vapor de agua más aire.

$$NM_{H_2O} + NM_{Aire} = NM_{total\ de\ la\ mezcla} \quad (39)$$

Donde.

N : Número de moles de una molécula Nmoles

M : Masa molar que contiene una molécula kg/kmoles

NM : cantidad de masa que contiene una sustancia kg

La fracción de masa es definida por el contenido de materia en total de la mezcla como se identifica en la expresión a continuación.

$$m_{total\ de\ la\ mezcla} = \frac{m_{H_2O}}{m_{total\ de\ la\ mezcla}} + \frac{m_{Aire}}{m_{total\ de\ la\ mezcla}} \quad (40)$$

Cabe destacar que la cantidad de masa promedio guarda relación con la constante universal de la mezcla de gases de la siguiente manera.

$$M_{total\ de\ la\ mezcla} = \sum_i Y_i M_i = \frac{N_{H_2O} M_{H_2O}}{M_{total\ de\ la\ mezcla}} + \frac{N_{Aire} M_{Aire}}{M_{total\ de\ la\ mezcla}} \quad (41)$$

$$R_m = \frac{R_u}{M_{total\ de\ la\ mezcla}} \quad (42)$$

Donde.

R_m : Constante global de la mezcla de gases kJ/kmol K

R_u : Constante universal de la mezcla de gases kJ/kmol K

Por consiguiente se relacionan los términos a ideales o reales de una mezcla de gases. Un gas ideal se define como aquel cuyas moléculas se encuentran lo suficientemente alejadas como para que su movimiento de moléculas sea afectado por la presencia de otra y son identificados por la expresión

$$PV = RT \quad (43)$$

Y a los gases reales por la expresión.

$$PV = ZRT \quad (44)$$

Donde.

P : Es la suma de las Presiones parciales de la mezcla de gases KPa.

V : Es el volumen específico de la mezcla de gases m³/kg

R : constante universal de la mezcla de gases kJ/kmol K

T : Es la temperatura en unidades absolutas K

Z: al factor de compresibilidad solo para gases reales

La ley de Dalton de presiones parciales y la ley de Amagat de volumen aditivos indican que en una mezcla de gases la presión es el resultado de la sumatoria de las presiones parciales de los gases en la sustancia lo mismo para los volúmenes específicos [23].

Ley de Dalton.

$$P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m) \quad (45)$$

Ley de Amagat.

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i(T_m, P_m) \quad (46)$$

Relacionando ambas expresiones con la ecuación de gases ideales se obtiene.

$$P_m = \sum_{i=1}^k \frac{P_i(T_m, V_m)}{P_m} = \frac{N_i R_u T_m / V_m}{N_m R_u T_m / V_m} \quad (47)$$

$$V_m = \sum_{i=1}^k \frac{V_i(T_m, P_m)}{V_m} = \frac{N_i R_u T_m / P_m}{N_m R_u T_m / P_m} \quad (48)$$

Por ende.

$$\frac{P_i}{P_m} = \frac{V_i}{V_m} = \frac{N_i}{N_m} = Y_i \quad (49)$$

2.3.6.6. Modelos matemáticos en el análisis numérico CFD

Al realizar el análisis y modelado numérico para el proceso de secado de biomasa, se deben activar las ecuaciones pertinentes para la realización efectiva del proceso tales como: ecuación de energía, momentum, continuidad, viscosidad, solidificación, esfuerzos y resistencia mecánica.

Desarrollando las ecuaciones por medio de análisis CFD permitiendo utilizar herramientas de análisis de comportamiento de flujo de fluidos, se representa a continuación el conjunto de ecuaciones y desarrollo de las mismas [24].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (50)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (51)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (52)$$

G_k : Representa la generación de turbulencia energía cinética debido a los gradientes de velocidad media.

G_b : Es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad.

Y_M : Representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa global de disipación.

✓ Ecuación de conservación de masa o continuidad [25].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (53)$$

S_m : Es la masa que se añade a la fase continua de la segunda fase dispersa.

✓ Ecuación de conservación de momentum [26].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (54)$$

Donde.

P : Es la presión estática.

$\bar{\tau}$: Es el esfuerzo tensor.

✓ Ecuación de energía.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (54)$$

k_{eff} : es el coeficiente de conductividad efectiva.

\vec{J}_j : Es el flujo de difusión de las especies.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (55)$$

Para sustancias incompresibles la entalpia sensible.

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (56)$$

Y_j : Es la fracción de masa de las especies en j.

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (57)$$

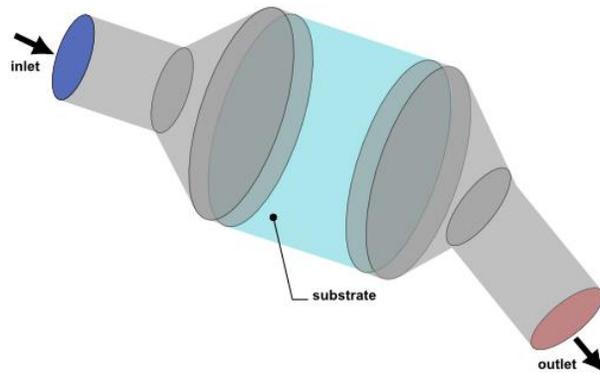
$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (58)$$

β : Es el coeficiente de expansión térmica.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (59)$$

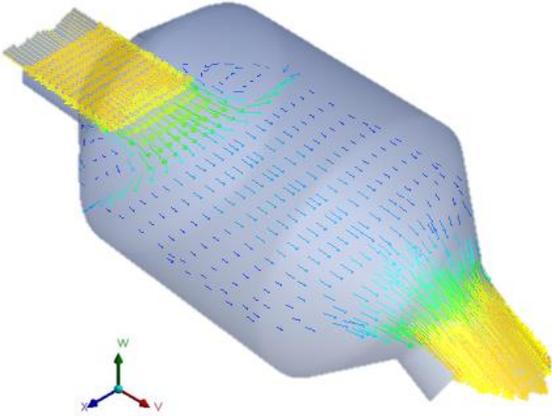
α : Coeficiente de difusividad térmica m^2/s

Figura 13. Esquema de la difusión de masa mediante CFD.



Fuente: I. ANSYS, Theory Guide,, SAS IP Release 16.0, © 2015.

Figura 14. Resultado de la difusión de masa mediante CFD.



Fuente: I. ANSYS, Theory Guide,, SAS IP Release 16.0, © 2015.

3. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en esta investigación es de tipo cuantitativa, la cual se lleva a cabo por experimentación y modelación, a continuación se muestran los pasos necesarios para la realización de la investigación.

- Búsqueda y recopilación de datos bibliográficos.
Por medio de revisión bibliográfica en fuentes especializadas de artículos, investigaciones, libros referentes al área del fenómeno a experimentar, con lo cual permita identificar características, enfoques, procesos, métodos de obtención de datos, precisos para el desarrollo total de la investigación planteada.
- Establecer objetivos para el desarrollo de la investigación.
La biomasa necesita ser estudiada para iniciar el proceso de secado, para el proceso de secado requiere identificarse las variables del fenómeno, llevar a cabo una serie de experimentación y obtención de resultados, y con base a este modelo numérico solucionar en herramienta computacional.
- Identificación de variables en el proceso de secado.
Para iniciar un proceso como tal se debe conocer las variables que harán parte del desarrollo y ejecución del mismo, teniendo como indicador un número de parámetros medibles independientes y dependientes, con los cuales ya identificados se implementen instrumentos para recolección de datos, como termopares, hidrómetros, anemómetro, entre otros.
- Construcción del banco de pruebas.
Para la construcción se requiere conocer las características que componen el proceso de secado, tomando como base los factores y variables de respuesta que intervienen en el diseño experimental, así como la instrumentación

requerida para controlar de manera eficiente cada componente en el diseño experimental de las pruebas.

- Modelos matemáticos de las curvas características de secado.
Sometiendo parte de la superficie de las muestras de cascarilla de arroz, se inicia el proceso de secado implementando la ley de Fourier de transferencia de calor y la ley de Fick de transferencia de masa por difusión.
- Diseño experimental.
Tras obtener las variables dependientes e independientes del proceso se realiza un diseño experimental para determinación de los efectos entre los factores y variables de respuesta del experimento en estado transitorio, para correlacionar las interacciones en función de variables naturales como la temperatura, velocidad de secado, humedad retirada, cantidad de masa.
- Modelado computacional.
La lectura de las variables por medio de los instrumentos de medición, la aplicación experimental y obtención de correlaciones de las mismas en función de los términos de la cinética del secado, generan un modelo matemático el cual por medio de métodos numéricos de solución mediante software CFD representa una aproximación precisa del proceso real.
- Análisis y representación de resultados.
Los resultados experimentales y modelados serán comparados entre sí como motivo de validación de las correlaciones generadas, los resultados experimentales serán representados por medio de curvas indicadas por las variables de salida o respuesta en el proceso de secado de biomasa, curvas de velocidad con respecto a la humedad retirada, humedad retirada con respecto al tiempo de secado y los resultados de solución numérica o modelados se representan por medio de perfiles, planos, curvas, fracciones de masa.

3.1. Diseño de experimento

Sabiendo los fundamentos cinéticos del secado de biomasa se relacionan las variables identificadas como factores controlables en la puesta en marcha del experimento para ello se eligieron 4 factores y dos variables de respuesta con dos niveles notando un diseño experimental de cribado factorial de 2^4 . Los factores son elegidos por medio de la teoría de la cinética del secado que indica que en un proceso de secado interviene *energía por temperatura, velocidad de agente secante, condiciones ambientales como humedad relativa del ambiente, cantidad de masa a secar por muestra* [15].

Como variables de respuesta para la cinética de secado es fundamental los *tiempos de equilibrio y cantidad de humedad de equilibrio* en las muestras tratadas.

A continuación se presenta la relación de los niveles de agregación y los factores implementados en los tratamientos del experimento creando un diseño Factorial el cual estudiará los efectos de 4 factores en 32 corridas. El diseño deberá ser ejecutado en 2 bloques. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

Tabla 9. Diseño de cribado para el experimento.

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Masa	3,0	4,0	g	Sí
Velocidad	0,8	1,6	m/s	Sí
Temperatura	363,0	383,0	K	Sí
Humedad Relativa (HR)	55,0	80,0	%	Sí

Tabla 10. Variables de respuesta para el experimento.

Respuestas	Unidades
<i>Humedad</i>	<i>g.H2O</i>
<i>Tiempo de Equilibrio</i>	<i>min</i>

3.2. Tratamientos del diseño experimental

Al identificar el diseño experimental cribado factorial como se mencionó anteriormente y aleatorizado totalmente dando protección a variables ocultas o efectos de ruido, se obtiene el bloque de 32 tratamientos utilizando niveles altos y bajos en el experimento como se muestra en la tabla de tratamientos siguiente.

Tabla 11. Tratamientos aleatorizado del experimento.

BLOQUE	Masa	Velocidad	Temperatura	Humedad Relativa(HR)
	g	m/s	K	%
1	3	1,6	383	80
1	4	1,6	383	80
1	3	0,8	363	80
1	4	0,8	363	55
1	4	1,6	363	55
1	4	1,6	363	80

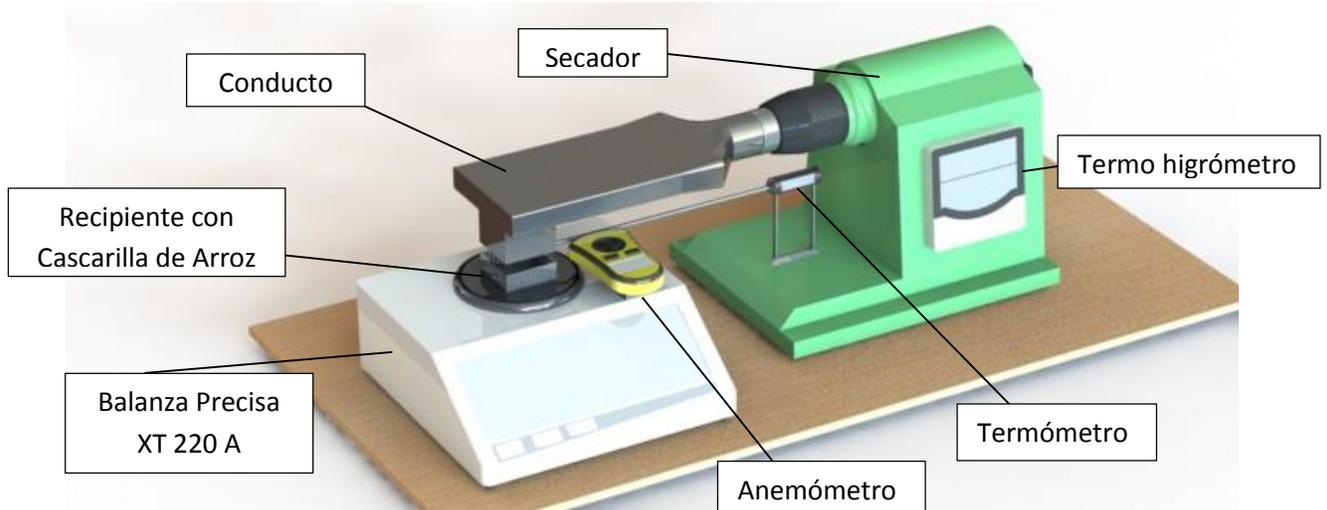
1	3	1,6	363	55
1	3	0,8	383	55
1	3	1,6	383	55
1	4	0,8	363	80
1	4	1,6	383	55
1	4	0,8	383	55
1	3	1,6	363	80
1	3	0,8	363	55
1	4	0,8	383	80
1	3	0,8	383	80
2	3	1,6	383	80
2	4	1,6	383	80
2	3	0,8	363	80
2	4	0,8	363	55
2	4	1,6	363	55
2	4	1,6	363	80
2	3	1,6	363	55
2	3	0,8	383	55
2	3	1,6	383	55
2	4	0,8	363	80
2	4	1,6	383	55

2	4	0,8	383	55
2	3	1,6	363	80
2	3	0,8	363	55
2	4	0,8	383	80
2	3	0,8	383	80

3.3. Construcción del banco de pruebas y elementos de medición de datos

Para el desarrollo de los tratamientos experimentales se hace necesaria la construcción de un banco de pruebas que permita la medición de las variables de respuestas y el control de los niveles de los factores como se menciona en la Tabla 11, para ello se emplea un dispositivo secador acoplado a un conducto que permita el paso del agente secante hasta el recipiente donde se encuentra contenida la Cascarilla de Arroz, siendo este reposado sobre una balanza de serie Precisa XT 220 A con precisión de 0,0001 g, para medir la velocidad del Aire se emplea un anemómetro el cual permite medición tanto como de velocidades como de temperaturas, en un soporte se apoya un termómetro con punzón empleado para medir temperaturas internas de alimentos, y un termo higrómetro dual que permite mediciones de temperatura y humedad relativa del ambiente.

Figura 15. Banco de pruebas experimental.



3.4. Cálculos de las variables de entrada del proceso

Previo a las pruebas experimentales se hizo necesario conocer el contenido de humedad que presenta la cascarilla de arroz cultivada en el municipio de Magangué, Bolívar. Contenido obtenido por medio de una prueba experimental en un horno atmosférico manteniendo una temperatura de 110°C durante 12 horas continuas.

La masa de la biomasa húmeda empleada en la prueba fue 26 gr, tras la duración de 12 horas a una temperatura de 110°C la muestra obtuvo una masa de 23,13 g. Por medio de la ecuación número 20 para contenido de humedad se obtiene.

$$X_{bs} = \frac{m_{humedad}}{m_{solido\ seco}} \quad (20)$$

Despejando

$$X_{bs} = \frac{m_{humedad}}{m_{solido\ seco}} = \frac{m_{solido\ humedo} - m_{solido\ seco}}{m_{solido\ seco}}$$

$$(X_{bs}m_{\text{solido seco}} + m_{\text{solido seco}}) = m_{\text{solido humedo}}$$

$$(X_{bs} + 1) = \frac{m_{\text{solido humedo}}}{m_{\text{solido seco}}}$$

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{solido humedo}}}{m_{\text{solido seco}}} - 1$$

De las relaciones anteriores se obtienen los siguientes datos.

$$X_{bs} = 0,12408128 \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de Solido seco}}$$

Lo que indica que para todas las muestras de cascarilla de arroz el contenido de humedad de equilibrio está dado por un Contenido de humedad en base seca de 0,12408128 kg de humedad/kg de solido seco, dato que pasa hacer la referencia base de las pruebas experimentales.

Los datos de energía de entrada para las pruebas experimentales son de vital importancia ya que estos proveen el valor en cantidad de energía que se debe suministrar para realizar el proceso de secado, teniendo dos niveles de temperaturas 383 K y 363 K con el cual se calienta el agente secante aire a dos niveles de humedad relativa 55%HR y 80%HR se obtienen los siguientes datos de entalpía suministrada.

$$h_{\text{mezcla}} = h_{\text{aire}} + xh_{\text{vapor de agua}} \quad (60)$$

Donde.

h_{aire} : Es la entalpia del aire seco en $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_{\text{vapor de agua}}$: Es la entalpia del vapor de agua en el aire en $\frac{kJ}{kg}$

x : Es la humedad absoluta en $\frac{kg \text{ de vapor de agua}}{kg \text{ de Aire seco}}$

Para las condiciones previstas de 383 K a una humedad relativa de 80%HR, 383 K a una humedad relativa de 55%HR, 363 K a una humedad relativa de 80%HR, 363 K a una humedad relativa de 55%HR y por medio de la siguiente ecuación teórica se obtiene el contenido de humedad absoluta en el aire a diversas condiciones ambientales.

$$x = \frac{PM_v}{PM_G} \left(\frac{P_v}{P_T - P_v} \right) = 0,622 \left(\frac{P_v}{P_T - P_v} \right) \quad (61)$$

Donde.

P_v : Es la presión de vapor en Pa

P_T : Es la presión total en Pa

PM_v : Es el peso molecular del vapor

PM_G : Es el peso molecular del aire

Sabiendo que la humedad relativa está relacionada directamente con la presión de saturación y la presión de vapor se emplea la siguiente expresión.

$$HR = \frac{P_v}{P_s} \cdot 100 \quad (62)$$

Donde.

HR : Es la humedad relativa del ambiente

P_v : Es la presión de vapor en Pa

P_s : Es la presión de saturación en Pa

De las ecuaciones anteriores se obtienen las variables necesarias para el cálculo de la energía de entrada en las pruebas de los tratamientos, comenzando con la presión de vapor.

$$HR = \frac{P_v}{P_s} \cdot 100 \quad (62)$$

Despejando.

$$\frac{HR \cdot P_s}{100} = P_v$$

Obteniendo para los dos niveles de humedad relativa de 80%HR, 55%HR y de presión de saturación correspondientes a los dos niveles de temperaturas 383 K y 363 K, se calcula la presión de vapor por medio de propiedades para el agua saturada. Obteniéndose el valor de presión de vapor y la presión de Aire seco para la mezcla de gases a determinadas condiciones de humedad relativa como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Presiones por componente a determinadas condiciones.

Condiciones	Presión de vapor	Presión de Aire seco
80%HR 383 K	$P_v = 114704 Pa$	$P_a = 28676 Pa$
80%HR 363 K	$P_v = 56130 Pa$	$P_a = 44869 Pa$
55%HR 383 K	$P_v = 78859 Pa$	$P_a = 64521 Pa$
55%HR 363 K	$P_v = 38589 Pa$	$P_a = 62411 Pa$

Empleando la ecuación 61 se calcula la humedad absoluta para las 4 configuraciones de energía de entrada que se mostró anterior mente.

$$x = \frac{PM_v}{PM_G} \left(\frac{P_v}{P_T - P_v} \right) = 0,622 \left(\frac{P_v}{P_T - P_v} \right) \quad (61)$$

Tabla 13. Calculo de humedad absoluta a determinadas condiciones.

Condiciones	Humedad absoluta
80%HR 383 K	$x = 2,488 \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de Aire seco}}$
80%HR 363 K	$x = 0,778 \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de Aire seco}}$
55%HR 383 K	$x = 0,760 \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de Aire seco}}$
55%HR 363 K	$x = 0,385 \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de Aire seco}}$

Con ello se emplea la ecuación 60 para calcular la entalpia de la mezcla de gases como entalpia de entrada del proceso de secado para las mismas 4 configuraciones mencionadas anterior mente.

$$h_{mezcla} = h_{aire} + xh_{vapor\ de\ agua} \quad (60)$$

Tabla 14. Entalpia de la mezcla de gases a distintas condiciones de entrada.

Condiciones	Entalpia
80%HR 383 K	$h_{mezcla} = 6806 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
80%HR 363 K	$h_{mezcla} = 2160 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
55%HR 383 K	$h_{mezcla} = 2156 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
55%HR 363 K	$h_{mezcla} = 1114 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Conociendo la entalpía de entrada de proceso se dispone a calcular el flujo de masa para conocer el valor de la energía de entrada de proceso y las fracciones másicas de los componentes de la mezcla necesarios para el desarrollo del modelamiento numérico por medio de herramienta CFD, para ello es utilizada la siguiente expresión que relaciona a los volúmenes específicos de los componentes de la mezcla.

$$V_{mezcla} = V_{Aire\ seco} + xV_{vapor} \quad (63)$$

Donde.

$V_{Aire\ seco}$: Es el volumen específico del aire seco en $\frac{m^3}{kg\ Aire\ seco}$

$V_{vapor\ de\ agua}$: Es el volumen específico del vapor de agua en $\frac{m^3}{kg\ vapor}$

x : Es la humedad absoluta en $\frac{kg\ vapor}{kg\ Aire\ seco}$

Por lo tanto se hace necesario el cálculo del volumen específico del aire y por medio de la tablas de propiedades del agua saturada obtener el volumen específico del vapor de agua, para relacionar los términos por medio de la humedad absoluta e implementar la ecuación 63 despejando el volumen específico de la mezcla de gases.

Para el volumen específico del aire se utiliza la expresión de la ecuación 43 de gases ideales junto con la constante de los gases para el aire.

$$PV = RT \quad (43)$$

Donde.

P : Es la presión en Pa

V : Es el volumen específico en $\frac{m^3}{kg}$

R : Es la constante de los gases en $\frac{kJ}{kg K}$

T : Es la temperatura en unidades absolutas K

Despejando el volumen específico, utilizando las propiedades de los gases y las presiones de vapor y del aire se obtiene la siguiente tabla para las configuraciones de entrada para la mezcla de gases.

$$V_{Aire\ seco} = \frac{R_a T}{P_a}$$

$$V_{vapor} = \frac{R_v T}{P_v}$$

Tabla 15. Volumen específico de los componentes de la mezcla a determinada temperatura.

Temperatura	Volumen específico del aire	Volumen específico del vapor
80%HR 383 K	$V_{Aire\ seco} = 3,8332 \frac{m^3}{kg}$	$V_{vapor} = 1,5409 \frac{m^3}{kg}$
80%HR 363 K	$V_{Aire\ seco} = 2,3218 \frac{m^3}{kg}$	$V_{vapor} = 2,9846 \frac{m^3}{kg}$
55%HR 383 K	$V_{Aire\ seco} = 1,7036 \frac{m^3}{kg}$	$V_{vapor} = 2,2414 \frac{m^3}{kg}$
55%HR 363 K	$V_{Aire\ seco} = 1,6693 \frac{m^3}{kg}$	$V_{vapor} = 4,3412 \frac{m^3}{kg}$

Al utilizar todos los componentes de la ecuación 63 para obtener el volumen específico de la mezcla de gases teniendo en cuenta todas las condiciones ambientales como temperaturas y humedad relativa se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 16. Volumen específico de la mezcla de gases a determinadas condiciones.

<i>Condiciones</i>	<i>Volumen específico de la mezcla</i>
80%HR 383 K	$V_{mezcla} = 7,6669 \frac{m^3}{kg}$
80%HR 363 K	$V_{mezcla} = 4,6438 \frac{m^3}{kg}$
55%HR 383 K	$V_{mezcla} = 3,4071 \frac{m^3}{kg}$
55%HR 363 K	$V_{mezcla} = 3,3407 \frac{m^3}{kg}$

Entre los niveles de proceso se encuentra un factor determinante a la hora de calcular la energía implementada en el proceso y es la velocidad con la que es impulsado el agente secante en este caso la mezcla de gases antes mencionada, velocidad que es impulsada por un área de conducto determinada y a diversas condiciones de proceso por cada tratamiento que permiten el cálculo del movimiento de masa de la mezcla de gases o flujo másico de la mezcla de gases. En la siguiente tabla se muestran los valores de flujo másico para las configuraciones de entrada de proceso.

$$\dot{m}_{mezcla} = \rho \dot{V} = \rho A v = \frac{\dot{V}}{V} \quad (64)$$

Donde.

\dot{m}_{mezcla} : Es el flujo másico de la mezcla en $\frac{Kg}{s}$

ρ : Es la densidad de la mezcla en $\frac{Kg}{m^3}$

\dot{V} : Es el flujo volumétrico de la mezcla $\frac{m^3}{s}$

A : Es el área transversal del ducto m^2

v : Es la velocidad de la mezcla en $\frac{m}{s}$

V : Es el volumen específico en $\frac{m^3}{kg}$

Tabla 17. Flujo másico de la mezcla de gases a determinadas condiciones.

Condiciones	Área de conducto	Flujo másico de la mezcla
80%HR 383 K 1.6 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 7,5128E^{-4} \frac{kg}{s}$
80%HR 363 K 1.6 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 1,2404E^{-3} \frac{kg}{s}$
55%HR 383 K 1.6 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 1,6905E^{-3} \frac{kg}{s}$
55%HR 363 K 1.6 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 1,7242E^{-3} \frac{kg}{s}$
80%HR 383 K 0.8 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 3,7564E^{-4} \frac{kg}{s}$
80%HR 363 K 0.8 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 6,2018E^{-4} \frac{kg}{s}$
55%HR 383 K 0.8 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 8,4529E^{-4} \frac{kg}{s}$
55%HR 363 K 0.8 m/s	$3,6E^{-3}m^2$	$\dot{m}_{mezcla} = 8,6209E^{-4} \frac{kg}{s}$

Obtenido el flujo de masa a todas las condiciones de proceso, las entalpías de entrada a todas las condiciones de proceso, se dispone a realizar el cálculo de la energía total suministrada en la entrada del proceso de todos los tratamientos a realizar en las pruebas de secado utilizando la ecuación general de la energía que

se muestra a continuación y por consiguiente los resultados de los calores en la tabla posterior.

$$\dot{Q}_{mezcla} = h_{mezcla} * \dot{m}_{mezcla} \quad (65)$$

Donde.

\dot{Q}_{mezcla} : Es la tasa de calor a la entrada de los tratamientos en $\frac{kJ}{s}$

h_{mezcla} : Es la entalpia de la mezcla de gases del agente secante en $\frac{kJ}{kg}$

\dot{m}_{mezcla} : Es el flujo másico de la mezcla de gases del agente secante en $\frac{kg}{s}$

Tabla 18. Tasa de calor a todas las condiciones de entrada del proceso.

Condiciones	entalpía de la mezcla	Tasa de calor de la mezcla
80%HR 383 K 1.6 m/s	$h_{mezcla} = 6806 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 5,1132 \frac{kJ}{s}$
80%HR 363 K 1.6 m/s	$h_{mezcla} = 2160 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 2,6793 \frac{kJ}{s}$
55%HR 383 K 1.6 m/s	$h_{mezcla} = 2156 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 3,6447 \frac{kJ}{s}$
55%HR 363 K 1.6 m/s	$h_{mezcla} = 1114 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 1,9207 \frac{kJ}{s}$
80%HR 383 K 0.8 m/s	$h_{mezcla} = 6806 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 2,5566 \frac{kJ}{s}$
80%HR 363 K 0.8 m/s	$h_{mezcla} = 2160 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 1,3396 \frac{kJ}{s}$
55%HR 383 K 0.8 m/s	$h_{mezcla} = 2156 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 1,8224 \frac{kJ}{s}$
55%HR 363 K 0.8 m/s	$h_{mezcla} = 1114 \frac{kJ}{kg}$	$\dot{Q}_{mezcla} = 0,9604 \frac{kJ}{s}$

Para el desarrollo de la modelación numérica mediante herramienta CFD para modelado de comportamiento de fluidos es requerido llevar los términos de flujo de masa volúmenes es decir propiedades tanto intensivas como extensivas en la nomenclatura empleada por la herramienta por ello los términos de movimiento de masa para las ecuaciones de continuidad empleadas en el modelado deben ser ingresado en términos de fracciones másicas donde la suma de todas las fracciones da como igual a la unidad.

Utilizando la teoría de Dalton para presiones parciales y la teoría de Amagat para volúmenes parciales junto con las respectivas ecuaciones para la obtención de fracciones de masa y fracciones molares como se muestran a continuación se dispone a calcular los valores de entrada para todas configuraciones de los tratamientos del sistema para realizar el desarrollo del mismo mediante herramienta CFD como se describió con anterioridad.

Ley de Dalton.

$$P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m) \quad (45)$$

Empleándola para el cálculo de fracciones molares se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{P_i}{P} = \frac{N_i}{N} = x_i \quad (67)$$

Donde.

P_i : Es la presión parcial por componente i de la mezcla en Pa

P : Es la presión absoluta de la mezcla en Pa

N_i : Es el número de moles del componente i de la mezcla en mol

N : Es el número de moles de la mezcla en *mol*

x_i : Es la fracción molar del componente i

Despejando.

$$P_i = x_i P \quad (68)$$

$$\sum P_i = (\sum x_i) P = P \quad (69)$$

Ley de Amagat.

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i(T_m, P_m) \quad (46)$$

Empleándola para el cálculo de fracciones molares se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{V_i}{V} = \frac{N_i}{N} = x_i \quad (70)$$

V_i : Es el volumen parcial por componente i de la mezcla en $\frac{m^3}{kg}$

V : Es el volumen específico de la mezcla en $\frac{m^3}{kg}$

N_i : Es el número de moles del componente i de la mezcla en *mol*

N : Es el número de moles de la mezcla en *mol*

x_i : Es la fracción molar del componente i

Organizando términos y reemplazando por la ecuación de los gases ideales se obtiene la siguiente expresión.

$$V = \sum_{i=1}^c V_i \quad (71)$$

$$\sum V_i = \sum \frac{N_i RT}{P} = \frac{(\sum N_i) RT}{P} = \frac{N RT}{P} = V \quad (72)$$

Sabiendo que la masa total de la mezcla es la sumatoria de la masa de cada componente como se muestra en la siguiente ecuación.

$$m_{mezcla} = m_1 + m_2 \dots + m_i \dots + m_c = \sum_{i=1}^c m_i \quad (73)$$

Para el número de moles al igual que con la masa es la sumatoria de todos los moles de la mezcla de componentes sumados por individual.

$$N_{mezcla} = N_1 + N_2 \dots + N_i \dots + N_c = \sum_{i=1}^c N_i \quad (74)$$

Relacionando la masa de la mezcla con el número de moles de la mezcla y el peso molecular de la mezcla se obtiene la siguiente ecuación.

$$m_{mezcla} = N_1 M_1 + \dots + N_i M_i \quad (75)$$

Donde.

m_{mezcla} : Es la masa de la mezcla en *kg*

m_i : Es la masa del componente *i* de la mezcla en *kg*

N_{mezcla} : Es el número de moles de la mezcla en *mol*

M_i : Es el peso molecular del componente i de la mezcla en $\frac{g}{mol}$

Así mismo el peso molecular de la mezcla entonces es calculado por la siguiente expresión.

$$M_{mezcla} = \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i} = \sum x_i M_i \quad (76)$$

Entonces la fracción de masa queda expresada por.

$$\omega_i = \frac{m_i}{m_{mezcla}} = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (77)$$

Donde.

ω_i : es la fracción de masa del componente i de la mezcla

De las relaciones mostradas por la ley de Dalton y ley de Amagat junto con las expresiones para cálculo de fracciones molares y de masa se obtiene la siguiente tabla de fracciones para las condiciones de entrada de los tratamientos tanto experimental como para la modelación numérica.

Tabla 19. Fracción molar para las condiciones de entrada de la mezcla.

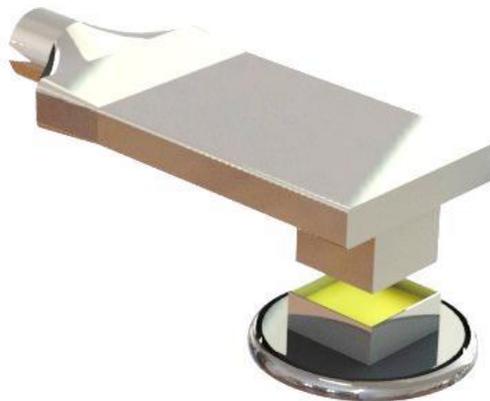
<i>Condiciones</i>	<i>Fracción molar H2O</i>	<i>Fracción molar Aire seco</i>
80%HR 383 K	0,2	0,8
80%HR 363 K	0,44424752	0,55575248
55%HR 383 K	0,45	0,55
55%HR 363 K	0,61793069	0,38206931

Tabla 20. Fracción molar para las condiciones de entrada de la mezcla.

<i>Condiciones</i>	<i>Fracción de masa H2O</i>	<i>Fracción de masa Aire seco</i>
80%HR 383 K	0,28673501	0,71326499
80%HR 363 K	0,56243707	0,43756293
55%HR 383 K	0,56815539	0,43184461
55%HR 363 K	0,72227492	0,27772508

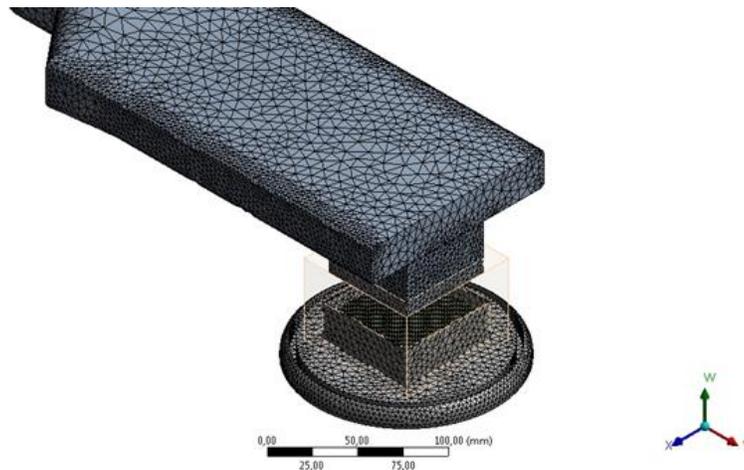
En el desarrollo del modelamiento numérico mediante herramienta CFD para simular y validar los modelos experimentales se da comienzo por generar la geometría a la cual se delimita el estudio y simplifica la mayor cantidad de proceso o recurso computacional, para ello solo se seleccionó la zona de importancia es decir donde da comienzo la salida de la mezcla de fluido a la salida del ducto el recipiente con la cascarilla de arroz y el aire ambiente que rodea al sistema como se muestra en la figura 16 a continuación.

Figura 16. Modelo CAD de la zona de estudio a modelar en CFD.



Generado el CAD del modelo se dispone a construir el mallado volumétrico del modelo que permita una óptima parametrización de las variables y ecuaciones del sistema a modelar.

Figura 17. Mallado volumétrico del sistema a modelar.

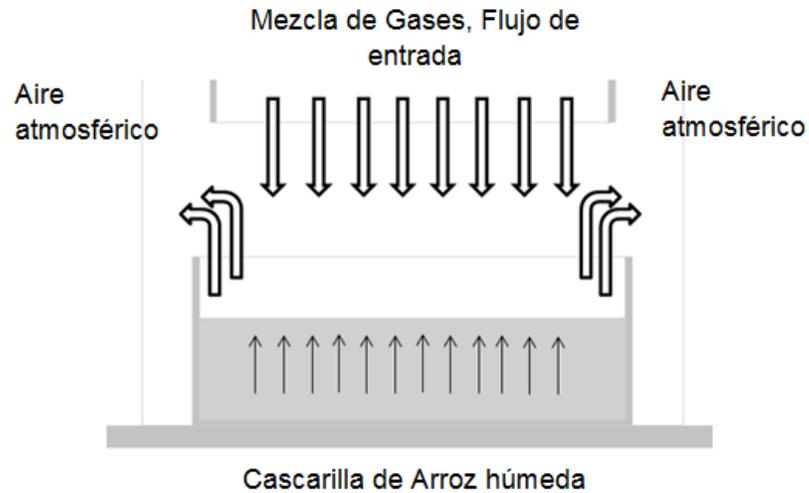


Utilizando un sistema de elementos de formación tetragonal para las paredes de los metales utilizados y el aire ambiente que rodea el sistema, una formación hexagonal para la muestra de *Cascarilla de Arroz* siendo esta elegida por presentar mejor formación y homogeneidad entre los elementos cúbicos o celdas, también por ser el objeto de estudio un sólido poroso se hace necesario una mejor gama de interpolación de datos en el interior de la muestra que son ajustados al número de nodos de cada celda teniendo la celda hexagonal 4 nodos más que la celda tetragonal por cada elemento permitiendo una mejor aproximación a la hora de solucionar el proceso.

Teniendo en el sistema un aproximado de 87324 Nodos y 137872 Elementos para realizar la primera aproximación en la ejecución del simulador, se dispone a parametrizar las condiciones de fronteras entre los mallados volumétricos

generados. Para ello se hace necesario la identificación de los modelos físicos que gobiernan en la zona de estudio que se muestra en la Figura 17.

Figura 18. Esquema de estudio para la experimentación y modelación.



Del esquema anterior representado como la zona de estudio se identifican y relacionan los modelos analíticos implementados para las condiciones de frontera que gobiernan en el análisis numérico. Modelos que se muestran en las siguientes ecuaciones:

Ecuación general de continuidad:

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Balance de masa:

$$\dot{m}_{mezcla\ de\ Gases} - \dot{m}_{Humedad\ en\ C.A.}(t) = \frac{dm_{Humedad\ en\ C.A.}(t)}{dt} \quad (78)$$

Balance molar:

$$\begin{aligned} & \dot{V}_{mezcla\ de\ Gases} C_{H_2O\ en\ mezcla} - \dot{V}_{Humedad\ en\ C.A.}(t) C_{H_2O\ en\ C.A.}(t) - r_{H_2O}(t)V \\ & = V \frac{dC_{H_2O\ en\ C.A.}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (79)$$

Balance de energía:

$$\dot{m}_{mezcla\ de\ Gases} h_{mezcla} - \dot{m}_{Humedad\ en\ C.A.}(t) h_{Humedad\ en\ C.A.}(t) = \frac{dQ_{Humedad\ en\ C.A.}(t)}{dt} \quad (80)$$

Ecuación general de difusión de masa (*segunda ley de Fick*):

$$\frac{\partial m_{Humedad\ en\ C.A.}}{\partial t} = DA \left(\frac{\partial^2 C_{H_2O\ en\ C.A.}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{H_2O\ en\ C.A.}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_{H_2O\ en\ C.A.}}{\partial z^2} \right) \quad (81)$$

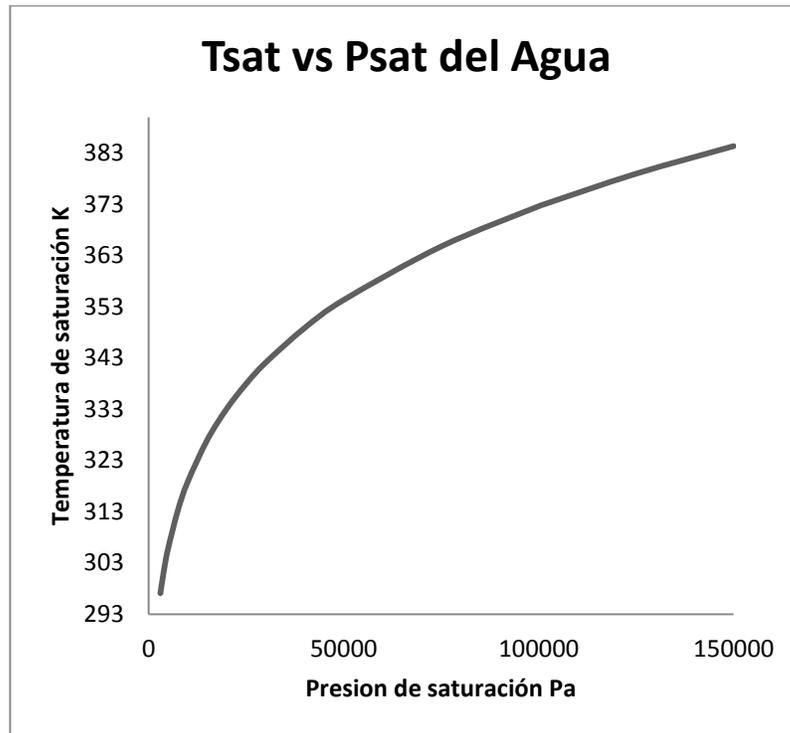
Calor por transferencia de calor por convección de la entrada (mezcla de gases):

$$\dot{Q}_{conveccion\ de\ mezcla\ de\ Gases} = h_{mezcla\ de\ Gases} A (T_{superficie\ C,A.} - T_{mezcla\ de\ Gases}) \quad (82)$$

Calor por transferencia de calor por conducción en la cascarilla de arroz unidimensional:

$$\dot{Q}_{conduccion\ en\ la\ C.A.} = -k_{C.A.} A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (83)$$

Grafica 1. Curva de saturación del agua.



Modelo polinómico implementado para la temperatura de saturación correspondiente al cambio de estado por evaporación de la fase líquida del agua a la fase gaseosa o vapor de agua.

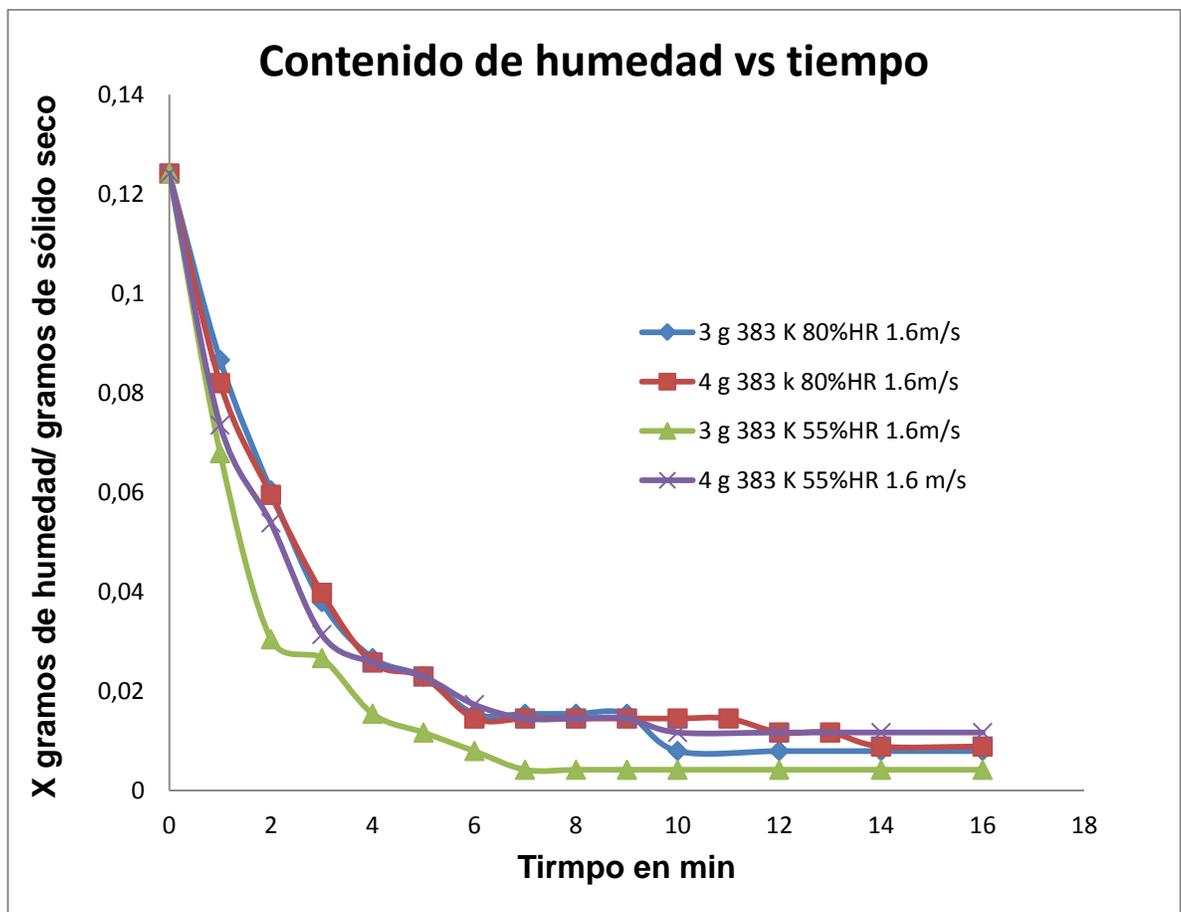
$$T_{sat} = -1e^{-18}(P^4) + 3e^{-13}(P^3) - 4e^{-8}(P^2) + 0,0027(P) + 293,03 \quad (85)$$

4. RESULTADOS

4.1. Curvas y modelos matemáticos por tratamientos de secado

Del diseño experimental aleatorizado planteado en la tabla 11 se obtienen las curvas experimentales por cada tratamiento los cuales fueron agrupados de acuerdo a la temperatura y la velocidad del agente secante en 4 series por gráfica, representando el cambio en el contenido de humedad en base seca con el tiempo en las gráficas de la 2 hasta 5 y la rapidez de secado con el contenido de humedad en base seca en las gráficas de la 6 hasta la 9.

Gráfica 2. Contenido de humedad con referencia de 383 K y 1,6 m/s.



De la gráfica 2 se destaca que al utilizar una temperatura de 383 K y una velocidad del agente secante de 1,6 m/s el tiempo de equilibrio mínimo entre las muestras es de aproximadamente unos 7 minutos siendo este a una humedad relativa del 55% con 3 g de masa, y el tiempo de equilibrio máximo de un aproximado de 14 minutos para una humedad relativa del 80% con masa de 4 g. Obteniéndose a su vez las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = -3e^{-7}t^5 + 2e^{-5}t^4 - 0,0006t^3 + 0,0076t^2 - 0,0463t + 0,1249 \quad (86)$$

$$R^2 = 0,9971$$

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = -7e^{-8}t^5 + 1e^{-5}t^4 - 0,0005t^3 + 0,0068t^2 - 0,0446t + 0,123 \quad (87)$$

$$R^2 = 0,9981$$

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = 3e^{-7}t^6 - 2e^{-5}t^5 + 0,0004t^4 - 0,0043t^3 + 0,0254t^2 - 0,0806t + 0,1245 \quad (88)$$

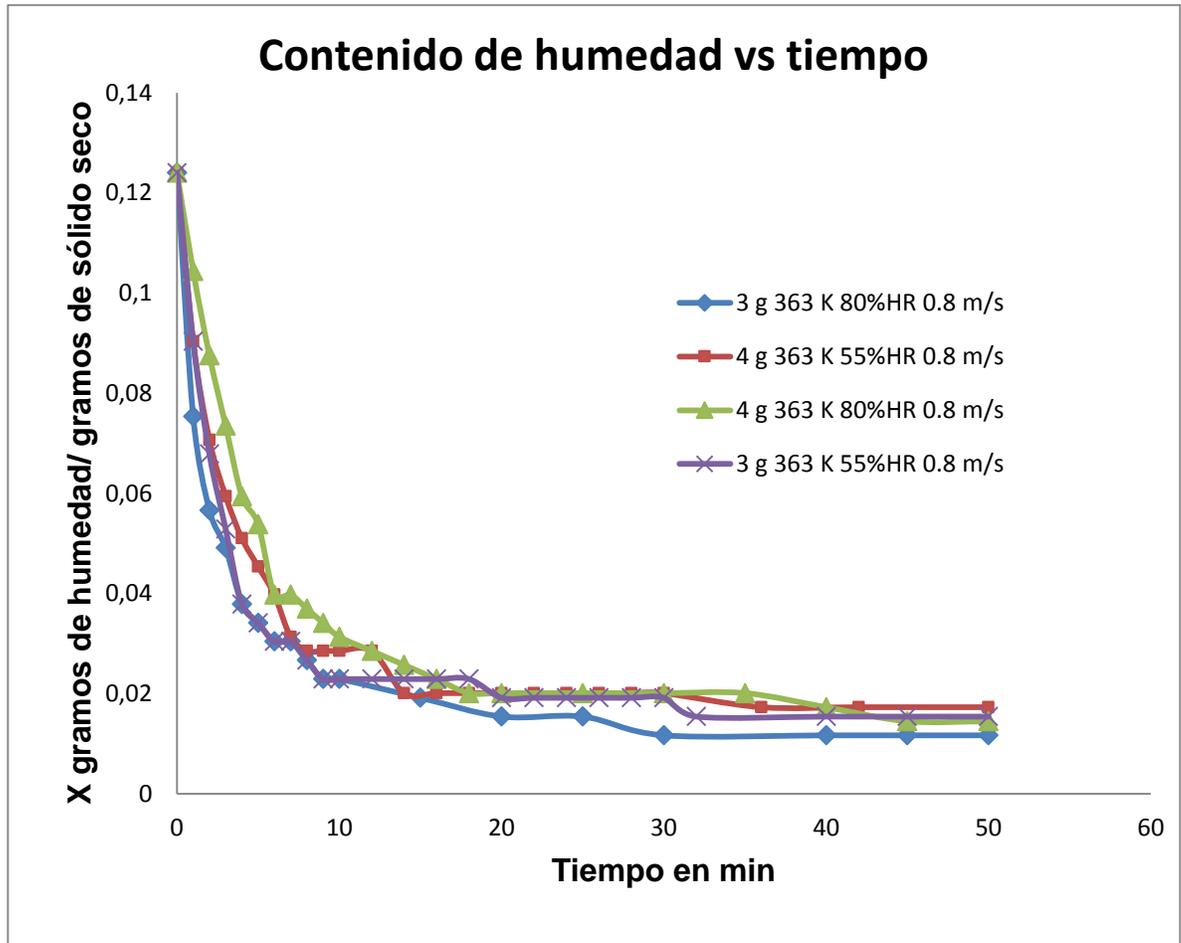
$$R^2 = 0,9958$$

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = -2e^{-6}t^5 + 7e^{-5}t^4 - 0,0014t^3 + 0,0124t^2 - 0,0564t + 0,1228 \quad (89)$$

$$R^2 = 0,996$$

Grafica 3. Contenido de humedad con referencia de 363 K y 0,8 m/s.



De la gráfica 3 se analiza que al utilizar una temperatura de 363 K y una velocidad del agente secante de 0,8 m/s el tiempo de equilibrio mínimo entre las muestras es de aproximadamente unos 30 minutos para las muestras de 3 g de masa y el tiempo de equilibrio máximo de un aproximado de 43 minutos para una humedad relativa del 80% con masa de 4 g. Obteniéndose las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 9e^{-10}t^6 - 1e^{-7}t^5 + 9e^{-6}t^4 - 0,0003t^3 + 0,0044t^2 - 0,0321t + 0,1132 \quad (90)$$

$$R^2 = 0,9702$$

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 6e^{-10}t^6 - 1e^{-7}t^5 + 6e^{-6}t^4 - 0,0002t^3 + 0,0032t^2 - 0,027t + 0,1184 \quad (91)$$

$$R^2 = 0,9896$$

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 4e^{-10}t^6 - 6e^{-8}t^5 + 4e^{-6}t^4 - 0,0001t^3 + 0,0024t^2 - 0,0238t + 0,1251 \quad (92)$$

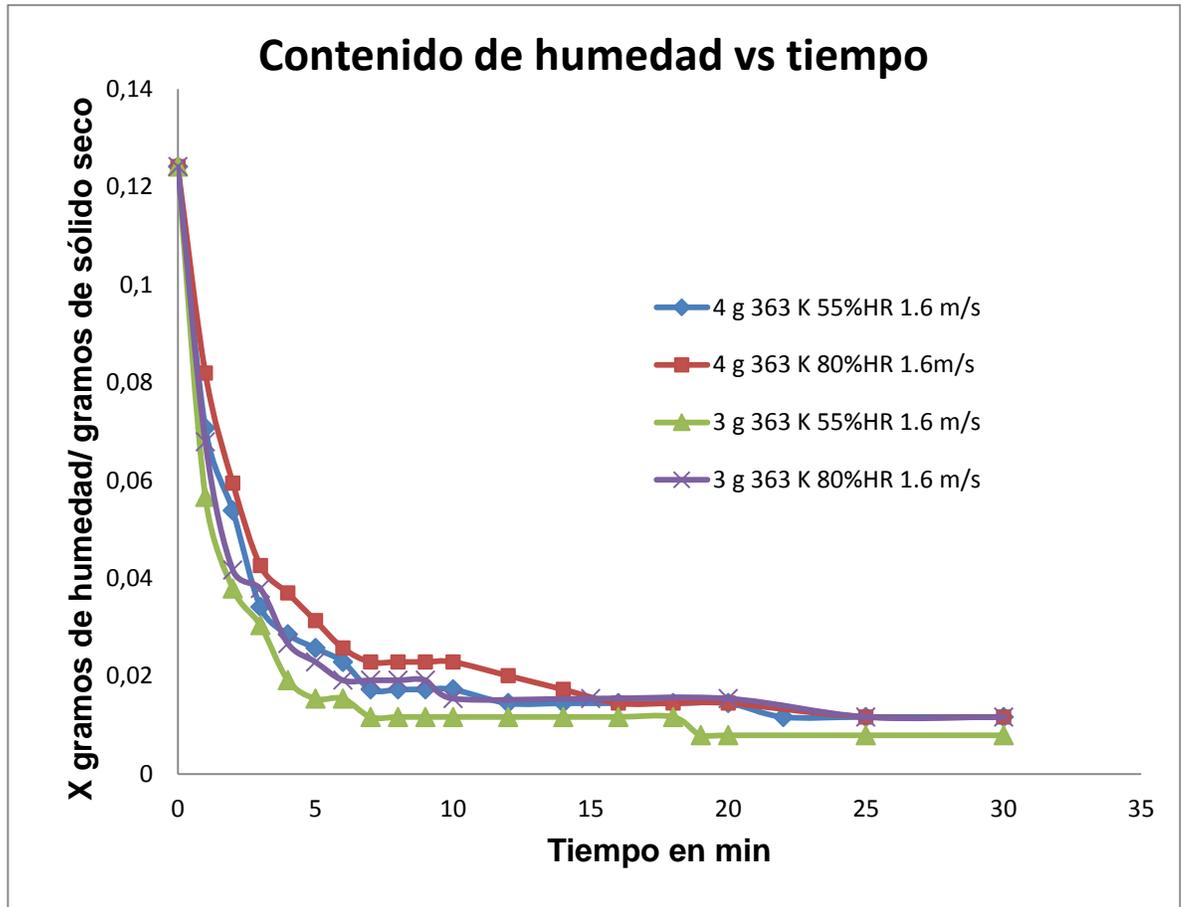
$$R^2 = 0,9971$$

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 7e^{-10}t^6 - 1e^{-7}t^5 + 8e^{-6}t^4 - 0,0002t^3 + 0,004t^2 - 0,0321t + 0,1202 \quad (93)$$

$$R^2 = 0,9918$$

Grafica 4. Contenido de humedad con referencia de 363 K y 1,6 m/s.



De la gráfica 4 se analiza que al utilizar una temperatura de 363 K y una velocidad del agente secante de 1,6 m/s el tiempo de equilibrio mínimo entre las muestras es de aproximadamente unos 19 minutos para la muestra de 3 g de masa con humedad relativa del 55% y el tiempo de equilibrio máximo de un aproximado de 30 minutos para una humedad relativa del 80% con masa de 4 g. Obteniéndose las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = 2e^{-8t^6} - 1e^{-6t^5} + 6e^{-5t^4} - 0,001t^3 + 0,0103t^2 - 0,0509t + 0,12 \quad (94)$$

$$R^2 = 0,9902$$

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = 1e^{-8t^6} - 1e^{-6t^5} + 4e^{-5t^4} - 0,0009t^3 + 0,0089t^2 - 0,0462t + 0,1226 \quad (95)$$

$$R^2 = 0,998$$

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = 2e^{-8t^6} - 2e^{-6t^5} + 7e^{-5t^4} - 0,0013t^3 + 0,0126t^2 - 0,0587t + 0,1168 \quad (96)$$

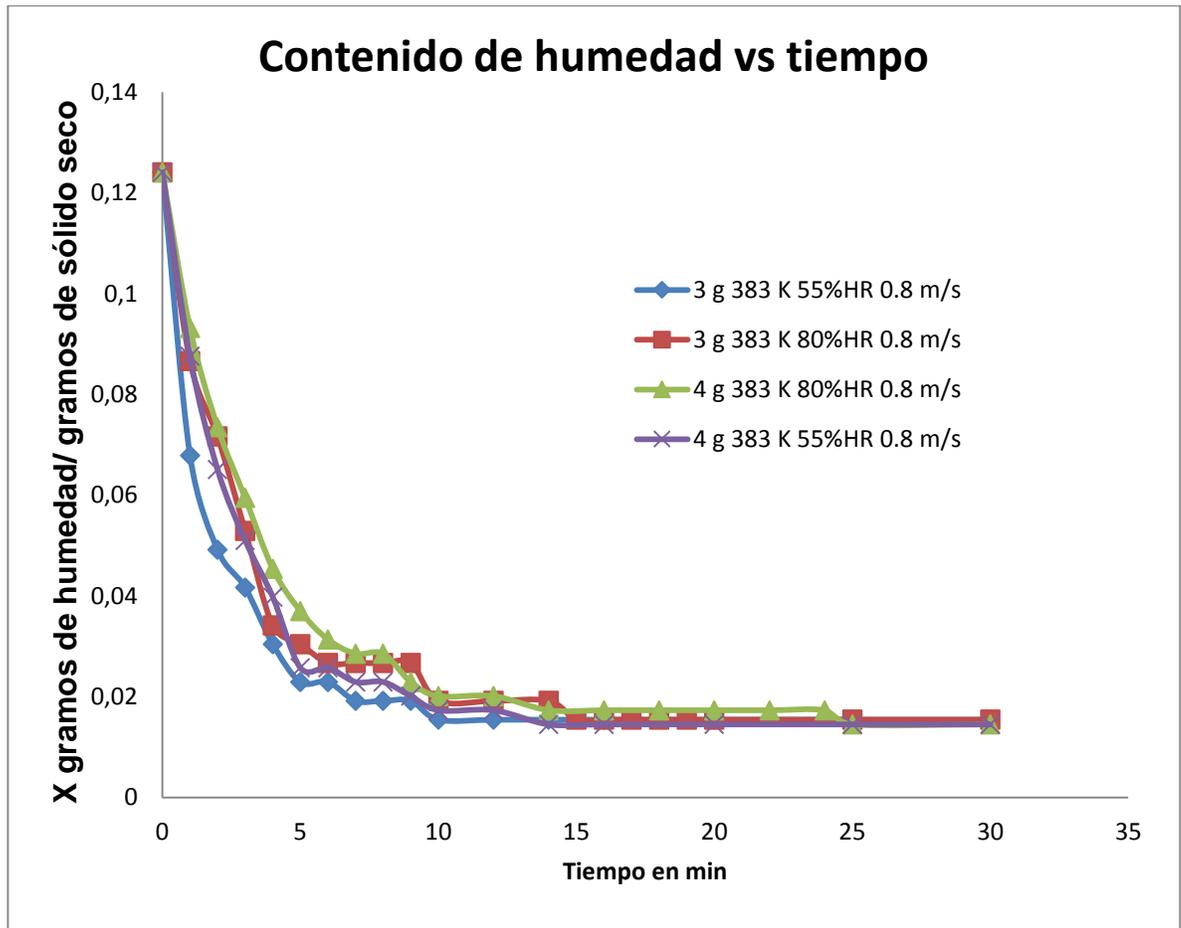
$$R^2 = 0,9742$$

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$x_{bs} = 2e^{-8t^6} - 2e^{-6t^5} + 8e^{-5t^4} - 0,0014t^3 + 0,0125t^2 - 0,0566t + 0,1197 \quad (97)$$

$$R^2 = 0,986$$

Grafica 5. Contenido de humedad con referencia de 383 K y 0,8 m/s.



De la gráfica 5 se analiza que al utilizar una temperatura de 383 K y una velocidad del agente secante de 0,8 m/s el tiempo de equilibrio mínimo entre las muestras es de aproximadamente unos 10 minutos para la muestra de 3 g de masa con humedad relativa del 55% y el tiempo de equilibrio máximo de un aproximado de 25 minutos para una humedad relativa del 80% con masa de 4 g. Obteniéndose las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 2e^{-8}t^6 - 2e^{-6}t^5 + 6e^{-5}t^4 - 0,0011t^3 + 0,0106t^2 - 0,0511t + 0,1188 \quad (98)$$

$$R^2 = 0,9846$$

Contenido de humedad para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 6e^{-9}t^6 - 6e^{-7}t^5 + 3e^{-5}t^4 - 0,0006t^3 + 0,0067t^2 - 0,0401t + 0,124 \quad (99)$$

$$R^2 = 0,9928$$

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 5e^{-9}t^6 - 5e^{-7}t^5 + 2e^{-5}t^4 - 0,0004t^3 + 0,0051t^2 - 0,034t + 0,1238 \quad (100)$$

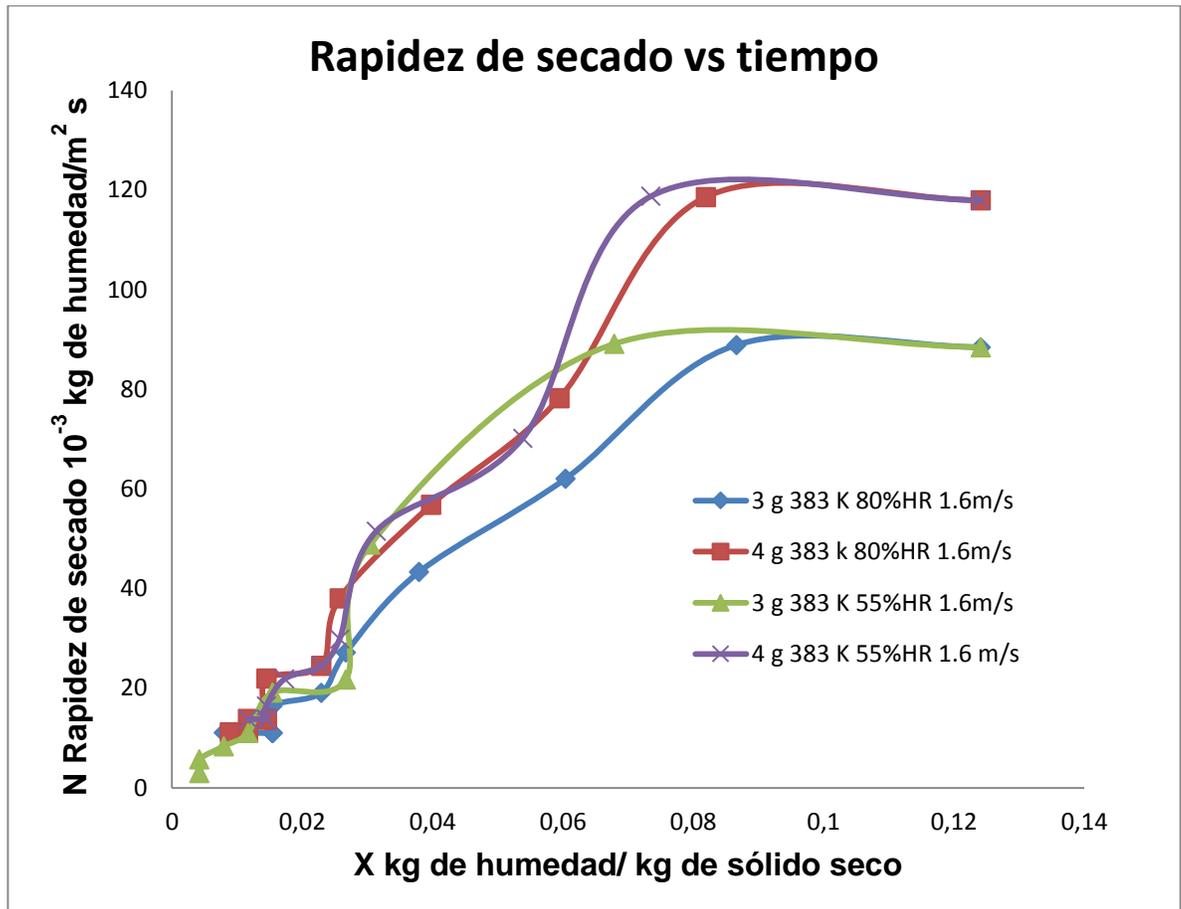
$$R^2 = 0,9986$$

Contenido de humedad para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$x_{bs} = 6e^{-9}t^6 - 7e^{-7}t^5 + 3e^{-5}t^4 - 0,0006t^3 + 0,0066t^2 - 0,0402t + 0,1234 \quad (101)$$

$$R^2 = 0,9973$$

Grafica 6. Rapidez de secado con referencia de 383 K y 1,6 m/s.



De la gráfica 6 se analiza que al utilizar una temperatura de 383 K y una velocidad del agente secante de 1,6 m/s el período de rapidez de secado constante hasta el contenido de humedad crítico para toda las muestras es de un intervalo de 0,14 hasta 0,08 kg de humedad/kg de solido seco, mostrando mayor rapidez las muestras con masa de 4 g, se muestra una mayor estabilidad al cambio de humedad relativa en las muestras con mayor masa para estas condiciones de secado. Se obteniéndose las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$N = 681801x_{bs}^4 - 271748x_{bs}^3 + 26779x_{bs}^2 + 235,26x_{bs} + 4,6292 \quad (102)$$

$$R^2 = 0,9913$$

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$N = -144481x_{bs}^3 + 19169x_{bs}^2 + 792,71x_{bs} + 0,8571 \quad (103)$$

$$R^2 = 0,9905$$

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$N = 4e^6x_{bs}^4 - 927314x_{bs}^3 + 65937x_{bs}^2 - 70,624x_{bs} + 4,2489 \quad (104)$$

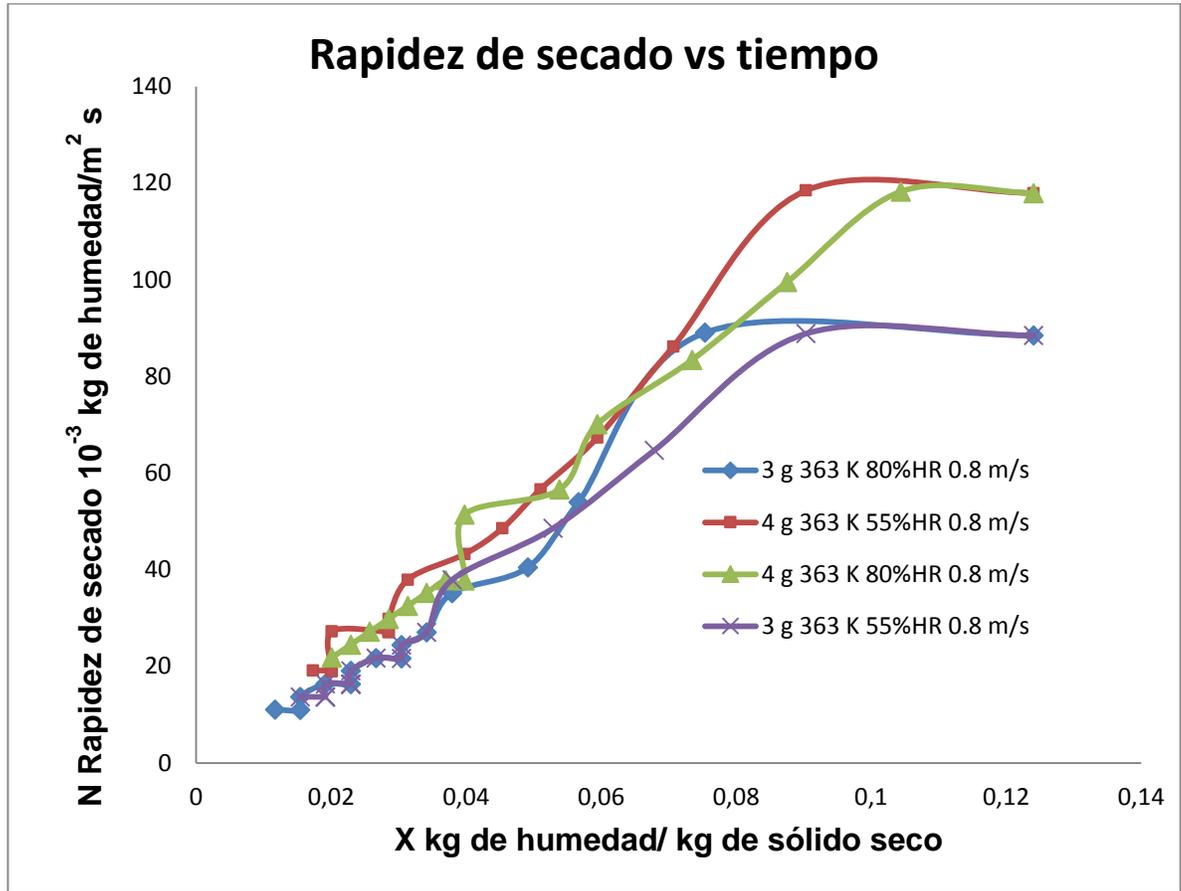
$$R^2 = 0,9755$$

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$N = -209599x_{bs}^3 + 30194x_{bs}^2 + 395,92x_{bs} + 4,7015 \quad (105)$$

$$R^2 = 0,9822$$

Grafica 7. Rapidez de secado con referencia de 363 K y 0,8 m/s.



De la gráfica 7 se analiza que al utilizar una temperatura de 363 K y una velocidad del agente secante de 0,8 m/s el periodo de rapidez de secado constante hasta el contenido de humedad crítico entre las muestras es de un intervalo de 0,14 hasta 0,08 kg de humedad/kg de sólido seco, mostrando mayor rapidez las muestras con masa de 4 g, se muestra estabilidad al cambio de humedad relativa en todas las muestras para estas condiciones de secado. Se obteniéndose las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$N = -242014x_{bs}^3 + 41796x_{bs}^2 - 890,18x_{bs} + 18,114 \quad (106)$$

$$R^2 = 0,9877$$

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$N = -202274x_{bs}^3 + 35888x_{bs}^2 - 529,62x_{bs} + 18,332 \quad (107)$$

$$R^2 = 0,9919$$

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$N = -4220x_{bs}^2 + 1623,7x_{bs} - 12,955 \quad (108)$$

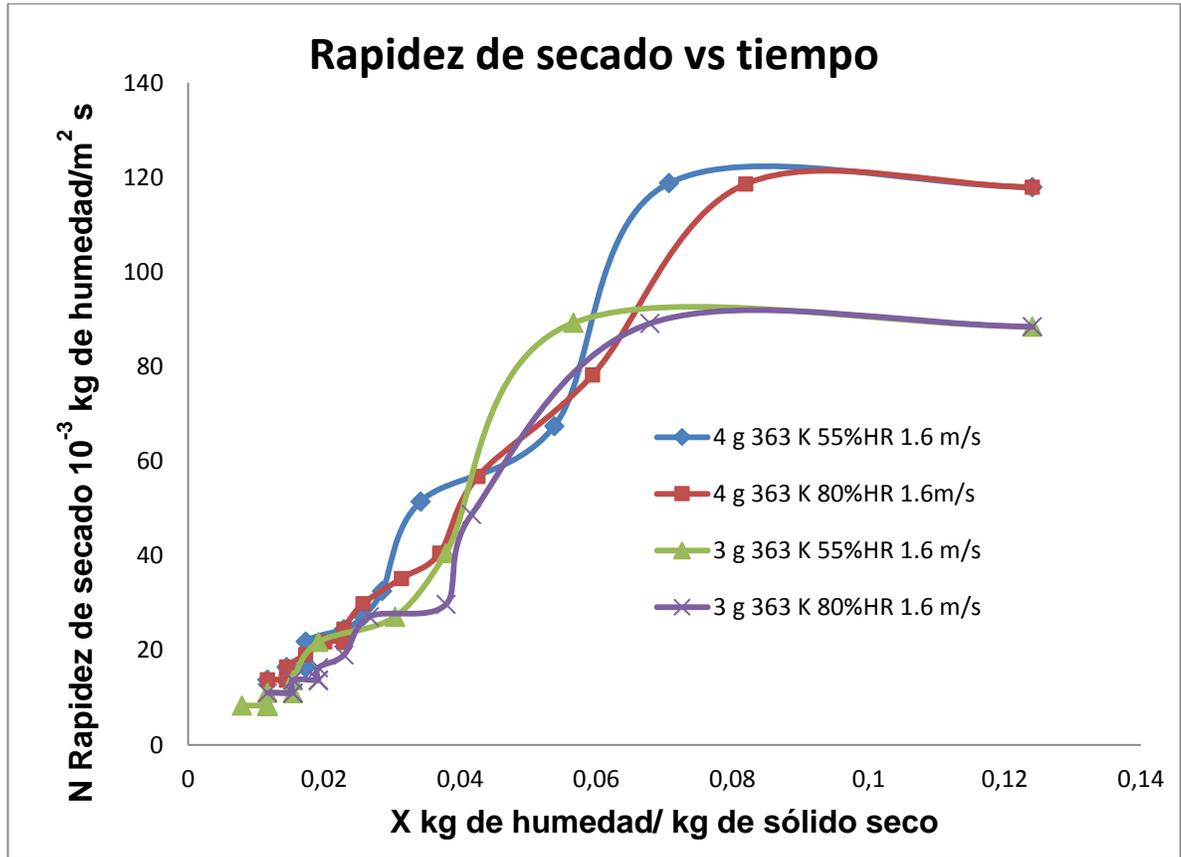
$$R^2 = 0,9833$$

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$N = -128938x_{bs}^3 + 20620x_{bs}^2 + 93,943x_{bs} + 5,8394 \quad (109)$$

$$R^2 = 0,9941$$

Grafica 8. Rapidez de secado con referencia de 363 K y 1,6 m/s.



De la gráfica 8 se analiza que al utilizar una temperatura de 363 K y una velocidad del agente secante de 1,6 m/s el periodo de rapidez de secado constante hasta el contenido de humedad crítico para toda las muestras es de un intervalo de 0,14 hasta 0,06 kg de humedad/kg de solido seco, mostrando mayor rapidez las muestras con masa de 4 g, se muestra estabilidad al cambio de humedad relativa en todas las muestras para estas condiciones de secado. Se obteniéndose las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$N = -280395x_{bs}^3 + 43802x_{bs}^2 - 248,18x_{bs} + 10,316 \quad (110)$$

$$R^2 = 0,983$$

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$N = -223644x_{bs}^3 + 35809x_{bs}^2 - 131,98x_{bs} + 10,42 \quad (111)$$

$$R^2 = 0,9961$$

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 55%, v= 1,6 m/s:

$$N = -10426x_{bs}^2 + 2147,2x_{bs} - 15,662 \quad (112)$$

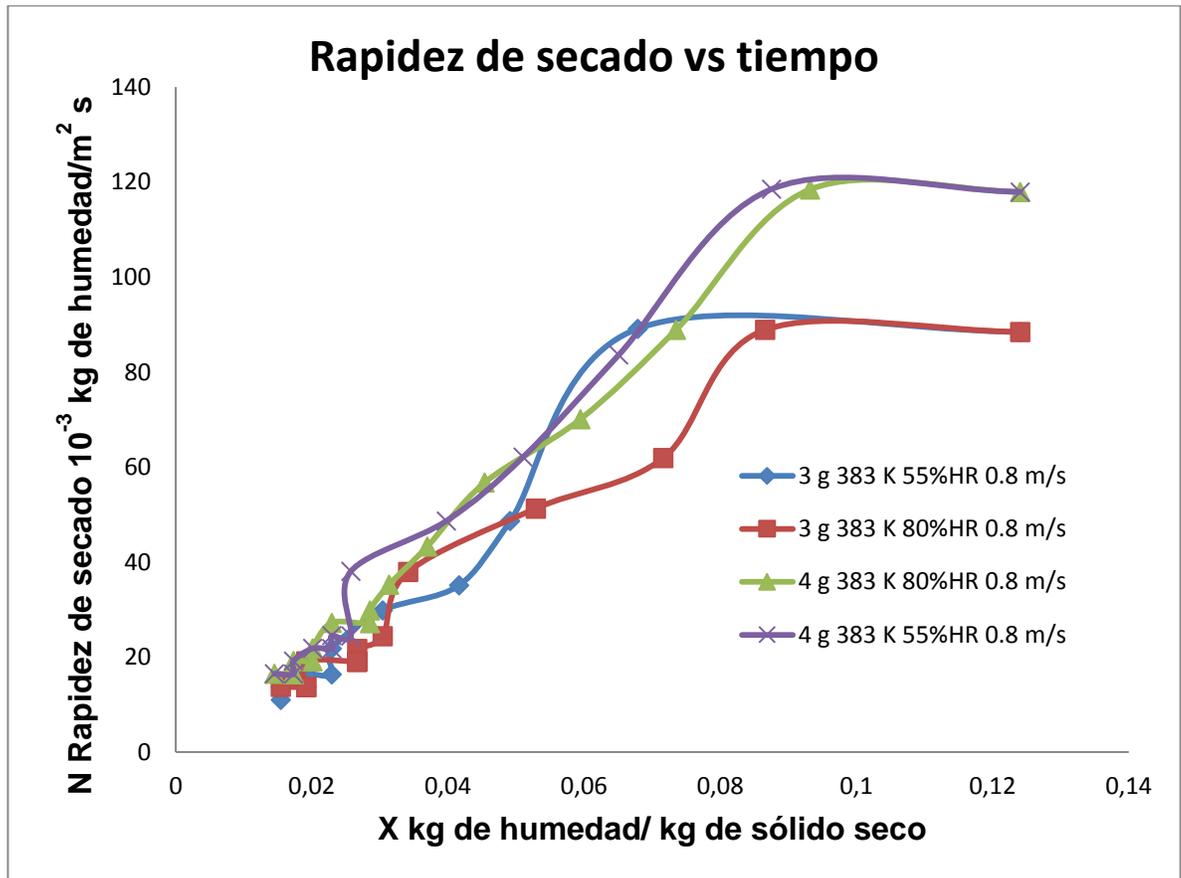
$$R^2 = 0,9424$$

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 363 K, HR= 80%, v= 1,6 m/s:

$$N = -9231,1x_{bs}^2 + 2035,5x_{bs} - 19,603 \quad (113)$$

$$R^2 = 0,9481$$

Grafica 9. Rapidez de secado con referencia de 383 K y 0,8 m/s.



De la gráfica 9 se analiza que al utilizar una temperatura de 383 K y una velocidad del agente secante de 0,8 m/s el periodo de rapidez de secado constante hasta el contenido de humedad crítico entre las muestras es de un intervalo de 0,14 hasta 0,08 kg de humedad/kg de sólido seco, mostrando mayor rapidez las muestras con masa de 4 g, se muestra estabilidad al cambio de humedad relativa en las muestras de mayor masa para estas condiciones de secado. Se obteniéndose las ecuaciones que representan el comportamiento de cada curva experimental de secado en el grafico para cada serie, como se muestran a continuación.

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$N = -8611,2x_{bs}^2 + 1962x_{bs} - 20,116 \quad (114)$$

$$R^2 = 0,943$$

Rapidez de secado para la serie; m= 3 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$N = -113029x_{bs}^3 + 17741x_{bs}^2 + 210,67x_{bs} + 5,5873 \quad (115)$$

$$R^2 = 0,9763$$

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 80%, v= 0,8 m/s:

$$N = -134187x_{bs}^3 + 21034x_{bs}^2 + 367,5x_{bs} + 5,6984 \quad (116)$$

$$R^2 = 0,9948$$

Rapidez de secado para la serie; m= 4 g, T= 383 K, HR= 55%, v= 0,8 m/s:

$$N = -178930x_{bs}^3 + 28728x_{bs}^2 + 61,567x_{bs} + 10,286 \quad (117)$$

$$R^2 = 0,9907$$

4.2. Análisis del diseño experimental factorial

Al realizar todos los tratamientos y las réplicas de los mismos mostrados en la tabla 11 y completando dicha tabla con los resultados de los tratamientos como se muestra en la tabla 25 a continuación, se analiza el diseño experimental para la obtención de los efectos por factor viendo que tan significativos son para el

experimento con relación a las dos variables de respuesta que son la humedad de equilibrio y el tiempo de equilibrio.

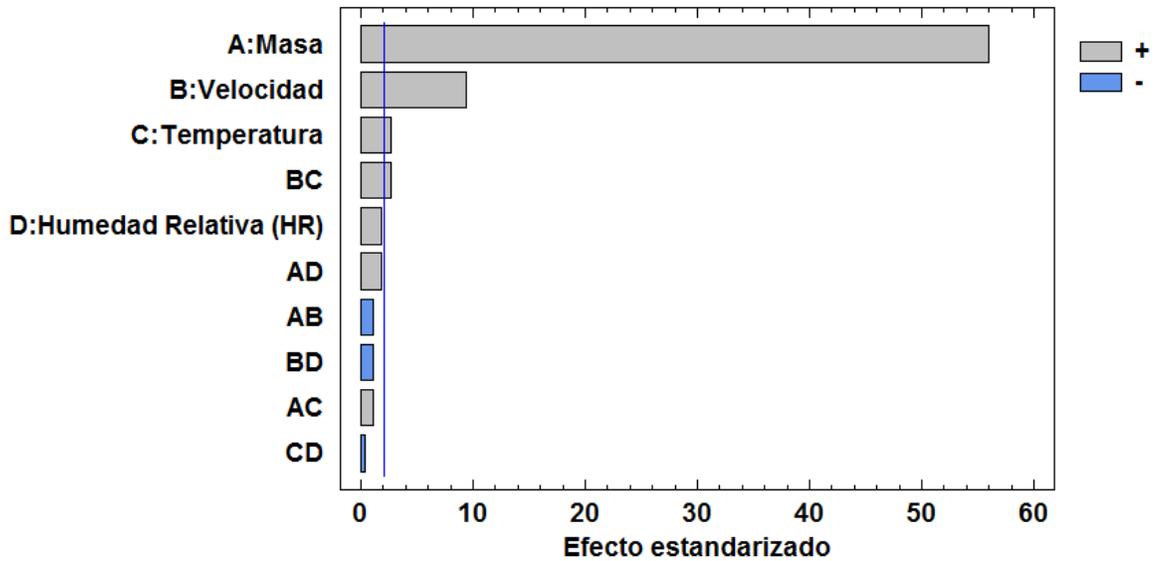
Tabla 21. Variables de respuesta de los tratamientos experimentales.

Masa	Velocidad	Temperatura	Humedad Relativa (HR)	Humedad de Equilibrio	Tiempo de Equilibrio
g	m/s	K	%	g.H₂O	min
3	1,6	383	80	0,31	10
4	1,6	383	80	0,41	15
3	0,8	363	80	0,3	30
4	0,8	363	55	0,38	35
4	1,6	363	55	0,4	22
4	1,6	363	80	0,4	30
3	1,6	363	55	0,31	19
3	0,8	383	55	0,29	10
3	1,6	383	55	0,31	6
4	0,8	363	80	0,39	43
4	1,6	383	55	0,4	10
4	0,8	383	55	0,39	14
3	1,6	363	80	0,3	25
3	0,8	363	55	0,29	32
4	0,8	383	80	0,39	25
3	0,8	383	80	0,29	15
3	1,6	383	80	0,32	10
4	1,6	383	80	0,41	14

3	0,8	363	80	0,3	30
4	0,8	363	55	0,38	36
4	1,6	363	55	0,39	22
4	1,6	363	80	0,4	30
3	1,6	363	55	0,31	20
3	0,8	383	55	0,29	12
3	1,6	383	55	0,32	7
4	0,8	363	80	0,39	45
4	1,6	383	55	0,4	11
4	0,8	383	55	0,39	14
3	1,6	363	80	0,3	25
3	0,8	363	55	0,29	34
4	0,8	383	80	0,39	25
3	0,8	383	80	0,29	15

Al analizar el experimento descrito por la tabla 25 se obtienen los efectos en forma de gráficos para cada variable de respuesta con respecto a los factores valorados en el proceso de secado así como la interacción entre ellos, a continuación en las figuras 19 y 20 se muestran los diagramas de efectos estandarizados para las variables de respuestas humedad de equilibrio y tiempo de equilibrio.

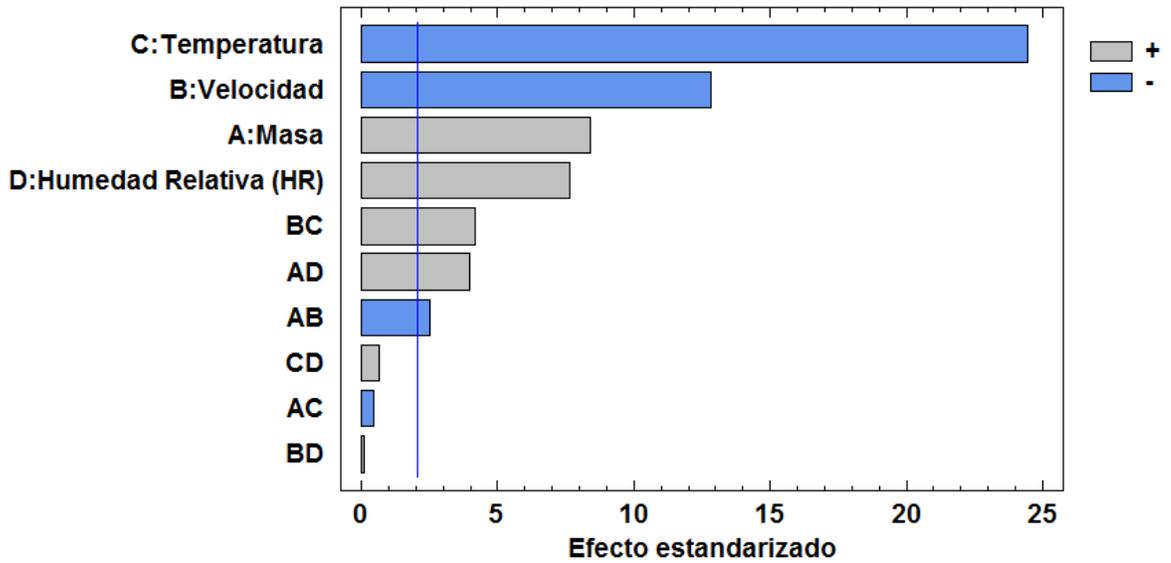
Figura 19. Diagrama de Pareto estandarizada para la humedad de equilibrio.



En la figura 19 de efecto estandarizado, se muestra cada uno de los factores implementados en el experimento identificándolos con las letras A, B, C, y D, así como a la interacción entre ellos por las combinaciones AD, AB, BD, AC, CD. Mostrando con color gris y azul los niveles de los factores es decir nivel máximo y nivel mínimo.

En la figura se muestra que factor o interacción entre los factores son significativos para la variable de respuesta nombrada como humedad de equilibrio, mostrando que la masa, la velocidad de agente secante, la temperatura y la interacción entre la velocidad de agente secante y la temperatura, son los efectos significativos para este experimento.

Figura 20. Diagrama de Pareto estandarizada para el tiempo de equilibrio.



De la figura 20 de efecto estandarizado para el tiempo de equilibrio analizándola del mismo modo que en la figura 18 para humedad de equilibrio, se obtienen los factores e interacción de factores significativos para el tiempo de equilibrio en el experimento, mostrando que solo las interacciones CD, AC, BD son los efectos que no son significativos para la obtención del tiempo de equilibrio.

A continuación se representa en las figuras 21 y 22 en forma de perfiles la superficie de respuesta para la humedad de equilibrio y el tiempo de equilibrio para una condición en específica de humedad relativa de 67,5 %.

Figura 21. Superficie de respuesta estimada para la humedad de equilibrio.

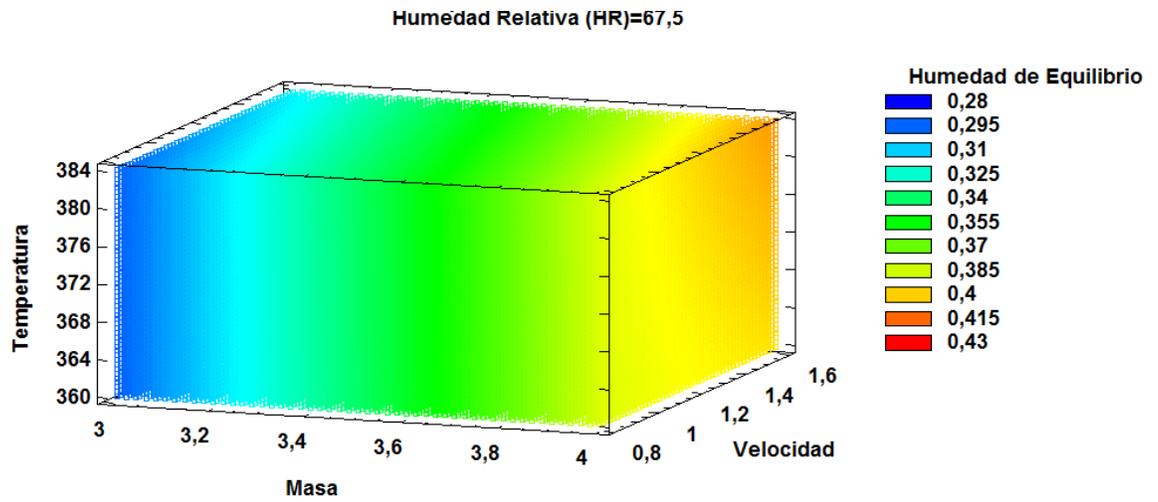
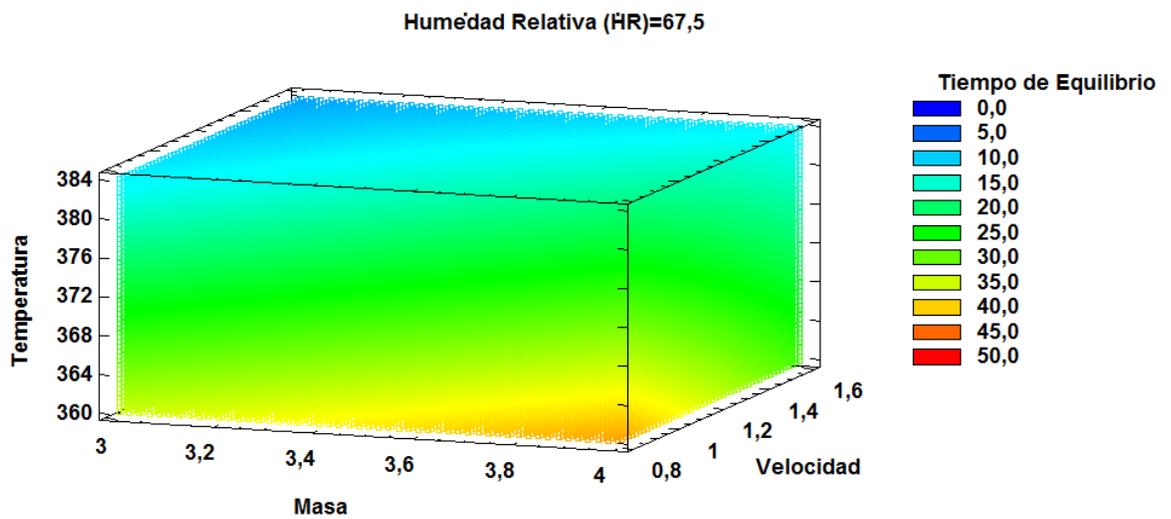


Figura 22. Superficie de respuesta estimada para el tiempo de equilibrio.



Obteniéndose del diseño experimental dos modelos matemáticos que permiten estimar el tiempo de equilibrio y humedad de equilibrio de una muestra a diferentes condiciones ambientales y de proceso. Los cuales se muestran a continuación:

Modelo para estimación de humedad de equilibrio:

$$H_e = 0,161625 + 0,093125 * m - 0,184453 * V - 0,0004375 * T + 0,000546875 * V * T \quad (118)$$

Modelo para estimación de tiempo de equilibrio:

$$T_e = 500,037 - 3,7625 * m - 127,227 * V - 1,25 * T - 0,545 * HR - 4,21875 * m * V + 0,215 * m * HR + 0,351562 * V * T \quad (119)$$

Donde.

T_e : Es el tiempo de equilibrio estimado en min

H_e : Es la humedad de equilibrio estimada en gr H₂O

m : Es la masa de la muestra a secar en g

V : Es la velocidad del agente secante en m/s

T : Es la temperatura de secado en unidades absolutas K

HR : Es la humedad relativa del ambiente en %

Nota: Las variables deben ser utilizadas en las unidades antes descritas en los modelos matemáticos para una correcta obtención de los resultados.

Tabla 22. Estimación experimental para el contenido de humedad de equilibrio.

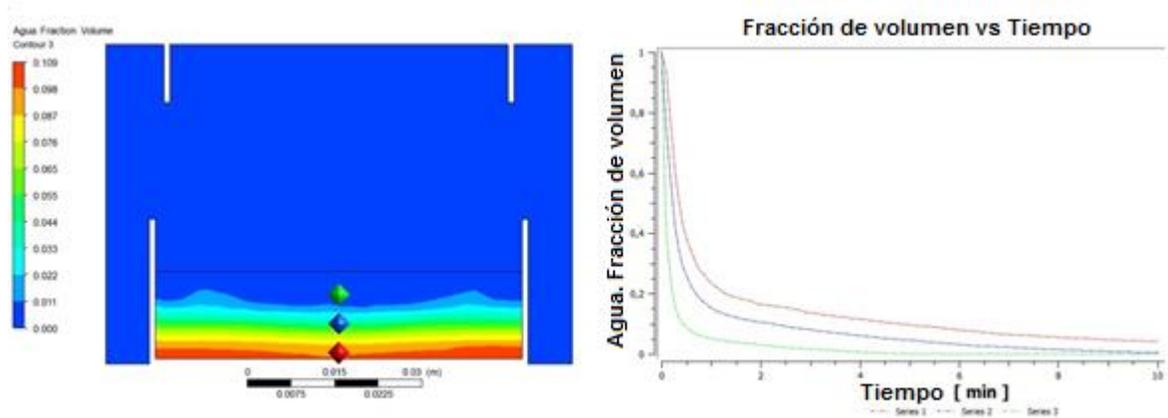
<i>Masa</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Humedad Relativa (HR)</i>	<i>Humedad de equilibrio</i>
<i>(g)</i>	<i>(m/s)</i>	<i>(K)</i>	<i>(%)</i>	<i>(g.H₂O)</i>
3,5	1,2	373,0	67,5	0,347813
4,5	1,33617	374,097	67,5	0,443919
5,5	1,47706	375,519	67,5	0,540407
6,5	1,62393	377,279	67,5	0,637396
7,5	1,77806	379,392	67,5	0,735022
8,5	1,94081	381,877	67,5	0,833445

4.3. Modelación numérica

El modelamiento numérico se desarrolló en la sección de la zona de estudio representada en la figura 18, obteniéndose en forma de perfiles, contornos, gráficos, el comportamiento de las variables del proceso de secado en el tiempo, para ello se utilizaron las mismas condiciones de los tratamientos en el diseño experimental.

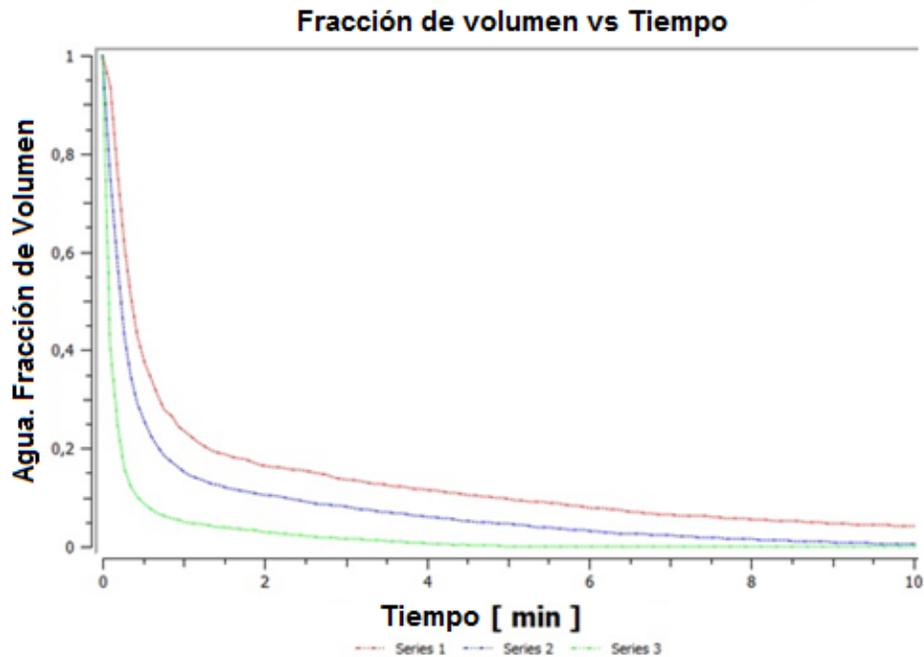
En la figura 23 a continuación se representa la fracción de volumen en un instante de tiempo determinado y como indicador tres puntos de medición en colores verde, azul, y rojo los cuales son graficados en función del tiempo en la figura de al lado.

Figura 23. Fracción de volumen a condiciones de 1,6 m/s 363 K 55 HR.



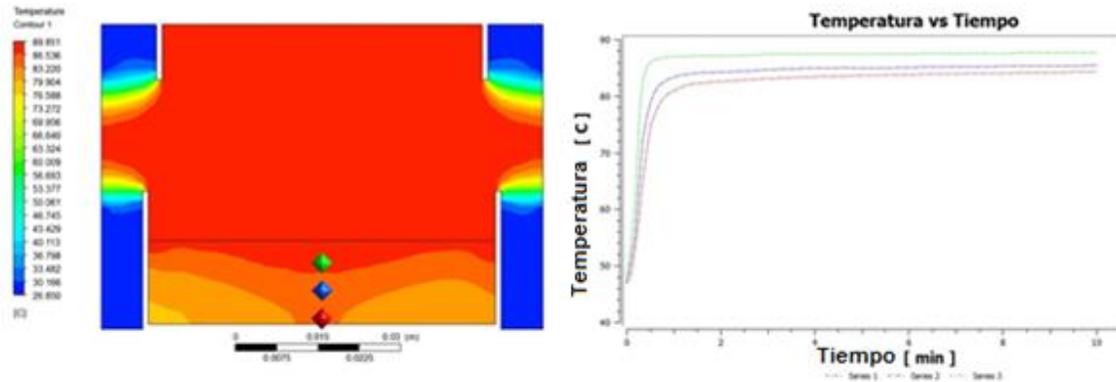
Identificados los tres puntos de medición se representa la gráfica 10 de fracción de volumen a lo largo del tiempo del tratamiento de secado a condiciones de velocidad de agente secante 1,6 m/s, temperatura de secado de 363 K y humedad relativa de 55%.

Grafica 10. Fracción de volumen a condiciones de 1,6 m/s 363 K 55 HR.



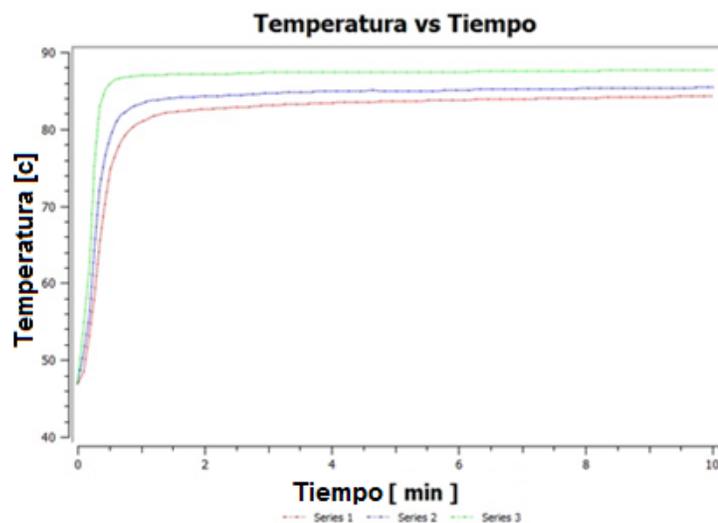
En la figura 24 a continuación se representa la distribución de temperatura en un instante de tiempo determinado y como indicador tres puntos de medición en colores verde, azul, y rojo los cuales son graficados en función del tiempo en la figura de al lado.

Figura 24. Perfil de temperatura a condiciones de 1,6 m/s 363 K 55 HR.



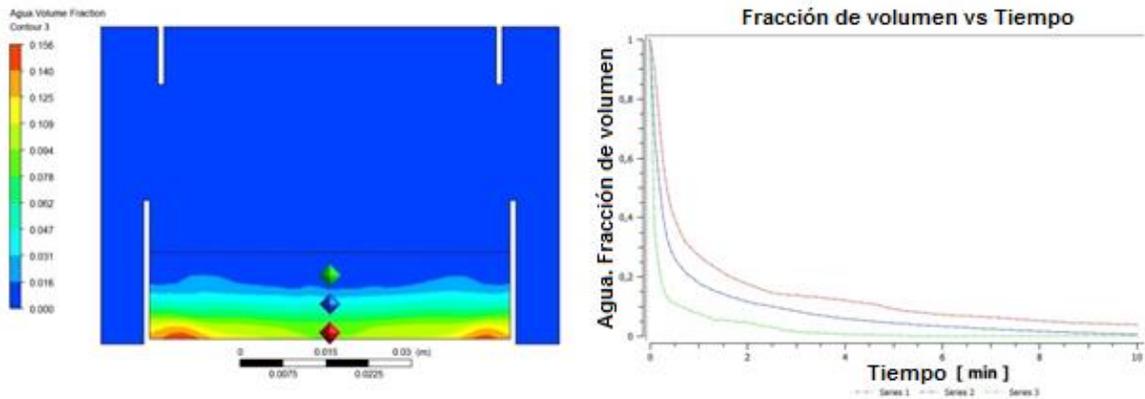
Identificados los tres puntos de medición se representa la gráfica 11 de distribución de temperatura a lo largo del tiempo del tratamiento de secado a condiciones de velocidad de agente secante 1,6 m/s, temperatura de secado de 363 K y humedad relativa de 55%.

Grafica 11. Distribución de temperatura a condiciones de 1,6 m/s 363 K 55 HR.



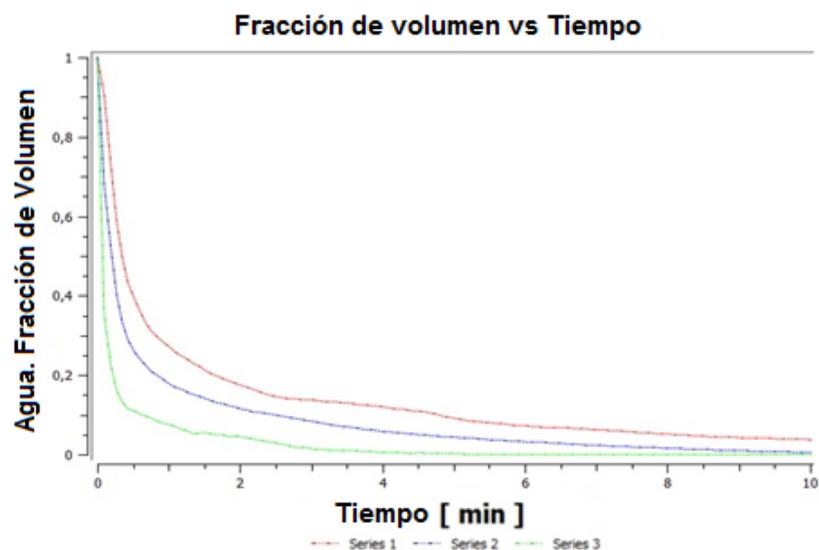
En la figura 25 a continuación se representa la fracción de volumen en un instante de tiempo determinado y como indicador tres puntos de medición en colores verde, azul, y rojo los cuales son graficados en función del tiempo en la figura de al lado.

Figura 25. Fracción de volumen a condiciones de 1,6 m/s 383 K 80 HR.



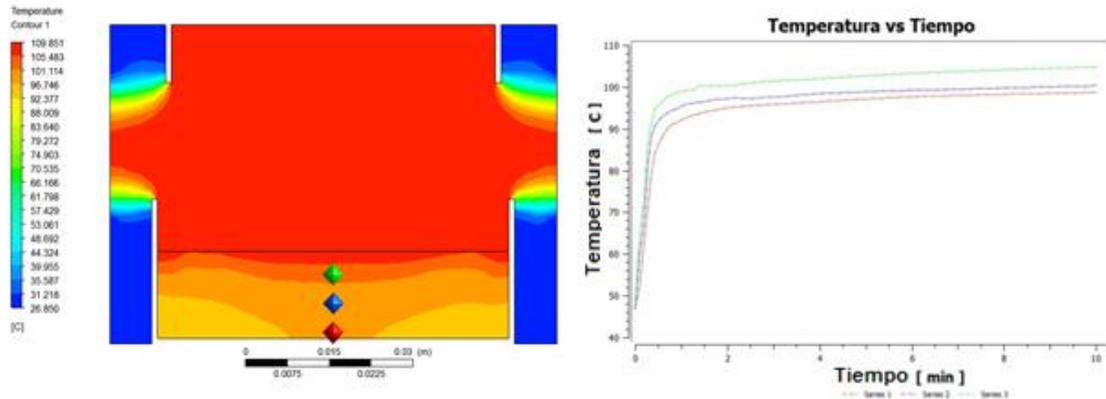
Identificados los tres puntos de medición se representa la gráfica 12 de fracción de volumen a lo largo del tiempo del tratamiento de secado a condiciones de velocidad de agente secante 1,6 m/s, temperatura de secado de 383 K y humedad relativa de 80%.

Grafica 12. Fracción de volumen a condiciones de 1,6 m/s 383 K 80 HR.



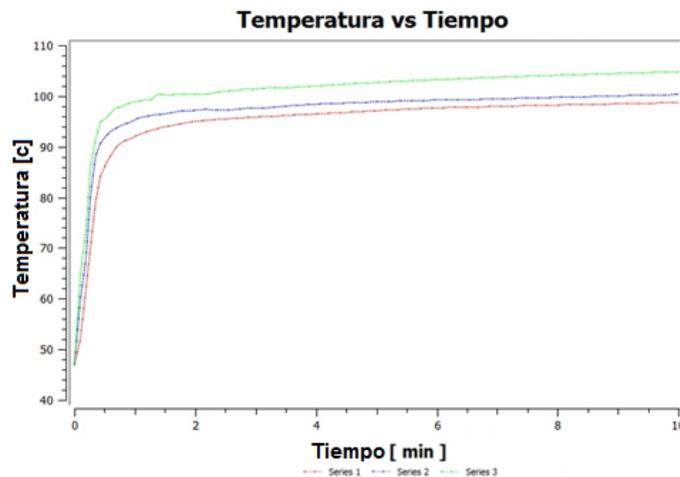
En la figura 26 a continuación se representa la distribución de temperatura en un instante de tiempo determinado y como indicador tres puntos de medición en colores verde, azul, y rojo los cuales son graficados en función del tiempo en la figura de al lado.

Figura 26. Perfil de temperatura a condiciones de 1,6 m/s 383 K 80 HR.



Identificados los tres puntos de medición se representa la gráfica 13 de distribución de temperatura a lo largo del tiempo del tratamiento de secado a condiciones de velocidad de agente secante 1,6 m/s, temperatura de secado de 383 K y humedad relativa de 80%.

Grafica 13. Distribución de temperatura a condiciones de 1,6 m/s 383 K 80 HR.



4.4. Comparación experimental y computacional.

De los resultados obtenidos tanto en las pruebas de los tratamientos de forma experimental y los resultados de las pruebas modeladas numéricamente, se hace una comparación entre dos condiciones en específico para validar la fiabilidad de ambos métodos de estudio, arrojando una buena aproximación entre casos como se muestran en las figuras 27 a la 30 a continuación.

Figura 27. Fracción de volumen para condición de proceso de 1,6 m/s 363 K 55 HR.

a) Modelación numérica b) Experimentación.

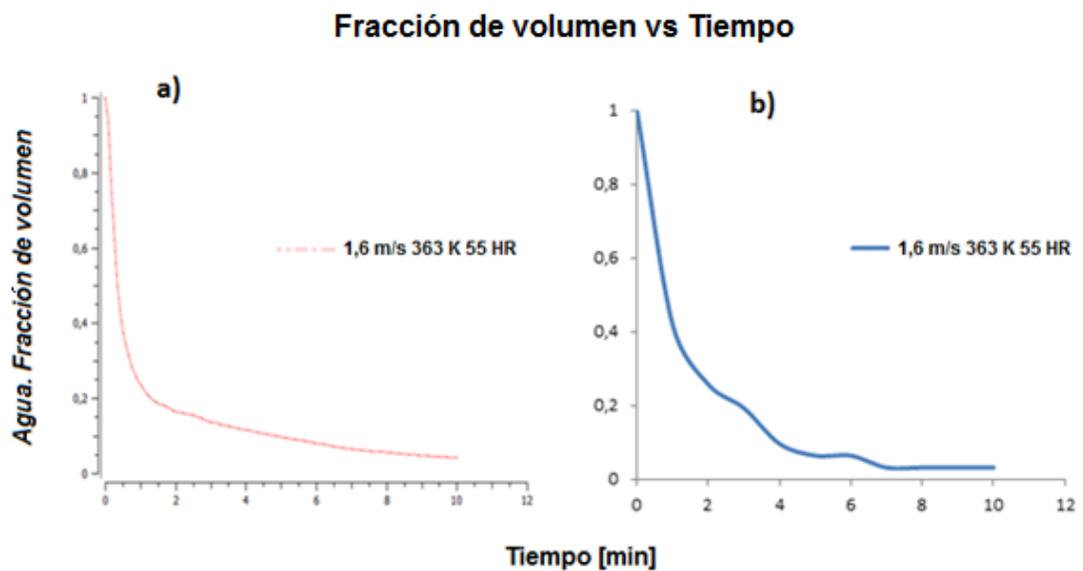
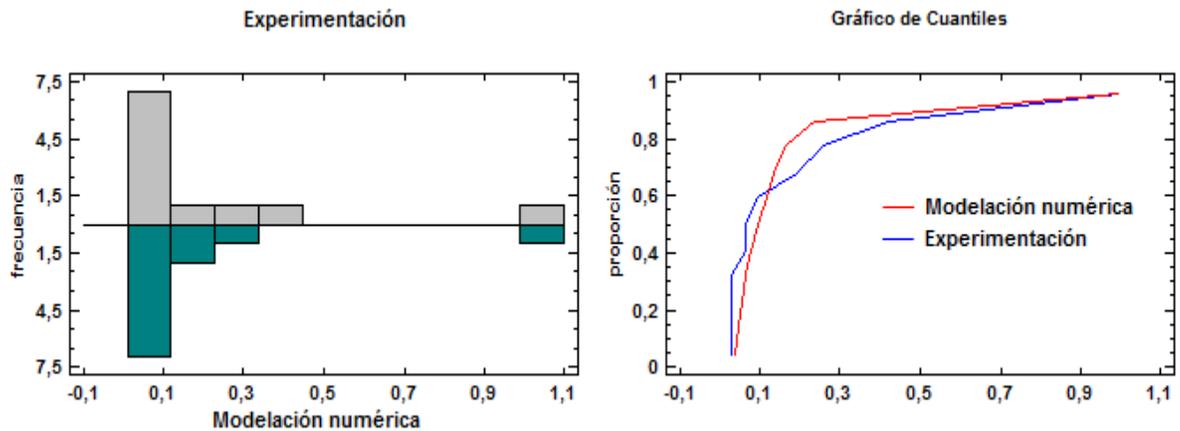


Figura 28. Comparación entre muestra experimental y modelación numérica, para condiciones de 1,6 m/s 363 K 55 HR por grafico de histogramas y de cuantiles.



De las imágenes anteriores que representan la comparación entre las muestras experimentales y modeladas numéricamente para la condición de operación de velocidad del agente secante de 1,6 m/s, temperatura de proceso de 363 K y humedad relativa de un 55%. Se obtiene por medio de gráfico de histograma y gráfico de cuantiles como se muestra en la figura 28 la desviación máxima estandarizada entre las muestras con un valor de 0,1858 y con un valor de desviación de entre las respuestas de 0,0082 para las condiciones de contenido de humedad de equilibrio y tiempo de equilibrio. Presentando un porcentaje de error entre curvas del 4,357%.

Figura 29. Fracción de volumen para condición de proceso de 1,6 m/s 383 K 80 HR.

a) Modelación numérica b) Experimentación.

Fracción de volumen vs Tiempo

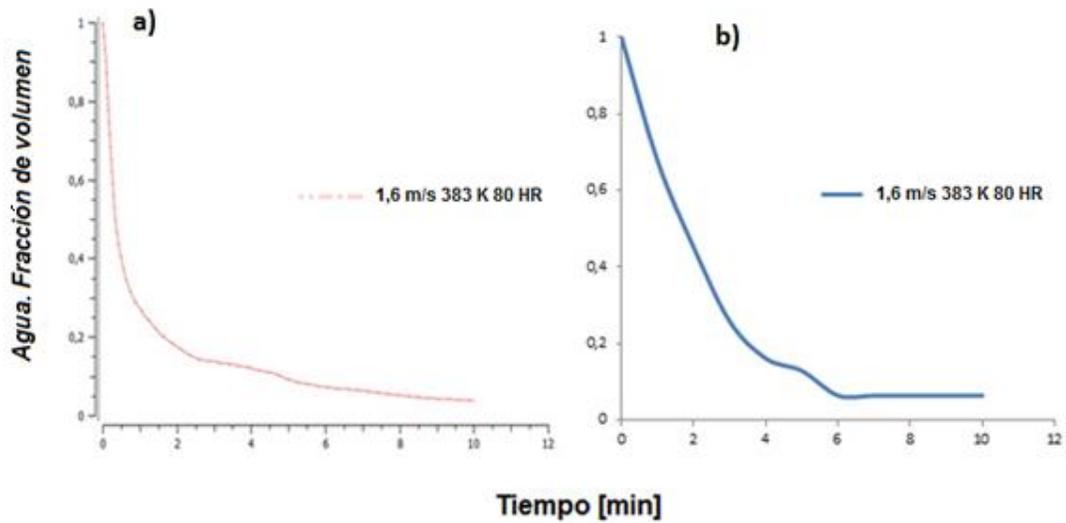
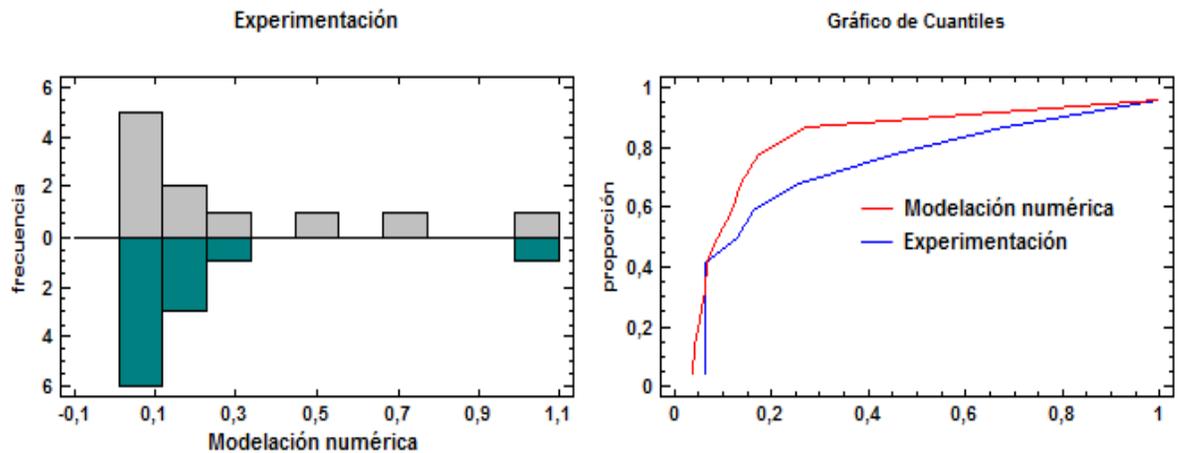


Figura 30. Comparación entre muestra experimental y modelación numérica, para condiciones de 1,6 m/s 383 K 80 HR por grafico de histogramas y de cuantiles.



De las imágenes anteriores que representan la comparación entre las muestras experimentales y modeladas numéricamente para la condición de operación de velocidad del agente secante de 1,6 m/s, temperatura de proceso de 363 K y humedad relativa de un 55%. Se obtiene por medio de gráfico de histograma y grafico de cuantiles como se muestra en la figura 30 la desviación máxima

estandarizada entre las muestras con un valor de 0,2770 y con un valor de desviación de entre las respuestas de 0,0268 para las condiciones de contenido de humedad de equilibrio y tiempo de equilibrio. Presentando un porcentaje de error entre curvas del 8,652 %

5. CONCLUSIONES

Al realizar las pruebas de secado experimentales e implementar los modelos estadísticos factoriales se destaca el efecto que tiene la variación de los factores como la humedad relativa, la velocidad del agente secante, la masa de las muestras y la temperatura del proceso para la estimación del contenido de humedad de equilibrio y el tiempo de equilibrio para un proceso de secado por convección en lecho fijo.

De los factores estudiados en esta investigación se obtuvo como resultado que la cantidad de humedad que se puede retirar en un proceso de secado depende de del comportamiento de los factores como la masa la temperatura la velocidad del agente secante y la interacción en conjunto de la temperatura y la velocidad del agente secante.

Para la estimación del tiempo en que se equilibra el contenido de humedad a retirar en muestras de cascarilla de arroz se debe tener en cuenta los efectos que tiene la cantidad de masa en la muestra, la temperatura de proceso, la velocidad del agente secante, la humedad relativa del ambiente de estudio, la interacción en conjunto de los efectos de la temperatura con la velocidad del agente secante, la cantidad de masa de la muestra con la humedad relativa del ambiente y la cantidad de masa de la muestra con la velocidad del agente secante, es decir para una muestra con 3 g, 1,6 m/s, 80% HR y 363 K, el tiempo de equilibrio se estima en un aproximado de 25 min.

Los modelos matemáticos obtenidos mediante técnicas estadísticas de diseño para la estimación del contenido de humedad de equilibrio y el tiempo de equilibrio tienen un intervalo de confianza del 95% para la respuesta media.

El modelamiento numérico ajustado a las características físicas de la cascarilla de arroz y las condiciones de trabajo experimental obtiene un buen comportamiento en

la estimación del tiempo de equilibrio y contenido de humedad de las muestras con valores de desviación entre 0,00823 y 0,0268. Siendo el análisis mediante elemento finito una buena práctica para la estimación de valores para secado de biomasa a convección en lecho fijo ya que permite la obtención de los perfiles de distribución de temperatura internos de las muestras entre otras variables.

6. RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar los experimentos de secado a convección para lechos no fijos.
- ✓ Utilizar otro tipo de material biomásico considerando los factores y efectos que estos conllevan.
- ✓ Implementar las técnicas estadísticas para el proceso de secado para la cascarilla de arroz en hornos atmosféricos.

REFERENCIAS

- [1] V. Agustín, S. Bienvenido y M. José P., «Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz,» *Scientia Et Technica*, pp. 255-260, 2007.
- [2] D. A. N. d. E. (DANE), «ENCUESTA NACIONAL DE ARROZ MECANIZADO I Semestre del 2014,» *Boletín de prensa DANE*, pp. 1-14, 21 Agosto 2014.
- [3] H. O. G. H., P. C. Correa y C. Jarén, «DRYING OF HUSK RICE GRAIN: MODELING AND THERMODYNAMIC PROPERTIES,» 2012.
- [4] Colombia, Ciencia y tecnología, vol. 15, Constitución política de Colombia: Lic. Enrique A. Rabe CERIDE, 2008.
- [5] B. C. Orton, Mediciones de Biomasa en Sistemas Agroforestales, Cali, Colombia: IICA / CATIE, 1983.
- [6] M. Martínez, M. José y M. R. Luis, Empresa y energías renovables, FC Editorial, 2006.
- [7] J. Abrego, A. Reseau y D. G. Galindo, Energía de la biomasa, Universidad de Zaragoza, 2010.
- [8] S. Azzouz, A. Guizani, W. Jomaa y A. Belghith, «Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes,» *Journal of Foot Engineering*, vol. 55, pp. 323-330, 2002.

- [9] A. R. Celma, S. Rojas y F. L. Rodriguez., «Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk,» *Chemical Engineering and Processing: Process intensification*, vol. 47, pp. 1810-1818, 2008.
- [10] T. Bartzanas, D. D. Bochtis, C. G. Sorensen, A. A. Sapounas y O. Green, « A numerical modelling approach for biomass field drying,» *Biosystems Engineering*, vol. 106, pp. 458-469, 2010.
- [11] L. Fagernas, J. Brammer, M. L. C. Wilèn y F. Verhoeff, « Drying of biomass for second generation synfuel production,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, pp. 1267-1277, 2010.
- [12] J. Gonzalez, B. Ledesma, A. Alkassir y J. Gonzales, « Study of the influence of the composition of several biomass pellets on the drying process,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. 4399-4406, 2011.
- [13] D. Chen, Y. Zheng y X. Zhu, « Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition,» *Bioresource Technology*, vol. 107, pp. 451-455, 2012.
- [14] T. Gebreegziabher, A. O. Oyedun y C. W. Hui, « Optimun biomass drying for combustion – A modeling approach,» *Energy*, vol. 53, pp. 67-73, 2013.
- [15] R. E. Treybal, OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA, Mc Graw Hill.
- [16] V. L. Streeter, E. B. Wylie y K. W. Bedford, MECÁNICA DE FLUIDOS, Santafé de Bogotá - Colombia: Mc Graw Hill, 2000.
- [17] A. A. H. M. G. Nonhebel, El secado de solidos en la industria quimica, Barcelona : REVERTÉ S. A., 2002.

- [18] A. S. D245.5, Moisture relationships of plant-based agricultural products, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Michigan USA: ASAE, 2001.
- [19] D.-W. Sun, «Comparison and Selection of EMC/ERH Isotherm Equations for Drying and Storage of Grain and Oilseed,» *Department of Agricultural and Food Engineering, University College Dublin, National University of Ireland, Earlsfort Terrace, Dublin 2, Ireland..*
- [20] R. L. D. M. D. Garg, «Equilibrium moisture content (EMC) relationships of three popcorn grain varieties and their incorporation into in-bin grain conditioning strategies,» *International Working Conference on Stored Product Protection*, vol. 9, pp. 994-1002.
- [21] L. O. D. H. HUTCHINSON, «Equilibrium Moisture Content of White Beans,» *School of Engineering, University of Guelph, Ontario N1G 2W1*, pp. 155-158.
- [22] Y. A. CENGEL, *Transferencia de Calor y masa*, Mexico D.F.: Mac Graw Hill, 2007.
- [23] Y. A. CENGEL, *TERMODINAMICA*, Mexico D.F.: Mc Graw Hill, 2009.
- [24] I. ANSYS, *Theory Guide*, SAS IP Release 16.0, © 2015..
- [25] D. C. a. B. P. S.-E. Kim, "Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code ANSYS FLUENT". In *Proceedings of the ICASE/LaRC/AFOSR Symposium on Modeling Complex Turbulent Flows*. Hampton,, Virginia, 1997.
- [26] W. C. Reynolds., "Fundamentals of turbulence for turbulence modeling and simulation", *Lecture Notes for Von Karman Institute Agard Report No. 755.*, 1987.

- [27] F. V. Gomez, «Columna de Extracción Líquido - Líquido,» Escuela profesional de Ingeniería Química , 2009.
- [28] P. V. P. Huilca, «La Operación Unitaria de humidificación,» Puerto Maldonado - Perú, 2010.
- [29] J. WILLIAM D. CALLISTER, Ciencia e ingeniería de los materiales, Barcelona: REVERTÉ S. A..
- [30] devatec, «Learn_more_on_Humidification,» [En línea]. Available: http://www.devatec.com/humidificacion/pdf/Learn_more_on_Humidification-esp.pdf.