

# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**



**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA:**

**MODELAMIENTO MEDIANTE MULTIPHYSICS AUTODESK  
DE UN SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR  
ALFALFA PARA LA AGROINDUSTRIA MASTERCUBOX S.A.**

**AUTOR: SALAZAR HURTADO OMAR OSWALDO**

**DIRECTOR: ING. CARLOS VILLARREAL**

**Ibarra- Ecuador**

**2015**

## IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del Proyecto Repositorio digital Institucional, determina la necesidad de disponerlos textos completos de forma digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo que pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DEL CONTACTO</b>	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100315991-8
APELLIDOS Y NOMBRES:	SALAZAR HURTADO OMAR OSWALDO
DIRECCIÓN:	BARRIO MIRAVALLE CALLE CIPRES Y NOGALES (OTAVALO)
E-MAIL:	blas13175@gmail.com
TELÉFONO MOVIL:	0992687354
<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
TÍTULO:	MODELAMIENTO MEDIANTE MULTIPHYSICS AUTODESK DE UN SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR ALFALFA PARA LA AGROINDUSTRIA MASTERCUBOX S.A.
AUTOR:	SALAZAR HURTADO OMAR OSWALDO
FECHA:	NOVIEMBRE DEL 2015
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
DIRECTOR:	ING. CARLOS VILLARREAL

## AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, OMAR OSWALDO SALAZAR HURTADO, con cédula de identidad 100315991-8, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo en la biblioteca de la Universidad con fines académicos, para aplicar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior artículo 144.

EL AUTOR:



.....  
Omar Oswaldo Salazar Hurtado  
CI: 100315991-8

## CONSTANCIA

Yo, OMAR OSWALDO SALAZAR HURTADO, manifiesto que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que soy el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asumo la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

de propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en  
calidad de autor del trabajo de grado denominado: MODELAMIENTO MEDIANTE  
Ibarra, Noviembre del 2015

MULTIPHYSICS AUTODESK DE UN SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR

EL AUTOR: PARA LA AGROINDUSTRIA MASTERCUBOX S.A., que ha sido  
desarrollado para optar por el título de INGENIERO EN MECATRONICA en la Universidad  
Técnica del Norte, quedando la Universidad Técnica del Norte para ejercer plenamente los

derechos morales de autor. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de

.....  
Omar Oswaldo Salazar Hurtado  
CI: 100315991-8

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRAGO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo OMAR OSWALDO SALAZAR HURTADO, con cedula de identidad Nro. 100315991 – 8, manifiesto de mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de grado denominado: MODELAMIENTO MEDIANTE MULTIPHYSICS AUTODESK DE UN SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR ALFALFA PARA LA AGROINDUSTRIA MASTERCUBOX S.A. , que ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO EN MECATRONICA en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad Técnica del Norte para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Además, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional.

Ibarra, Noviembre del 2015

.....  
Omar Oswaldo Salazar Hurtado  
CI: 100315991-8

**CERTIFICADO DEL ASESOR**

El señor Omar Oswaldo Salazar Hurtado ha trabajado en su totalidad en el desarrollo del proyecto de tesis “MODELAMIENTO MEDIANTE MULTIPHYSICS AUTODESK DE UN SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR ALFALFA PARA LA AGROINDUSTRIA MASTERCUBOX S.A.”, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica, trabajo que lo realizó con interés profesional y responsabilidad, es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Omar Oswaldo Salazar Hurtado

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carlos Villarreal', is written above a horizontal dashed line.

Ing. Carlos Villarreal

DIRECTOR PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por ser la luz que ha guiado mi camino durante todo este tiempo de formación académica, a mi madre por ser el pilar fundamental del hogar, a mis hermanos que me han sabido ayudar cuando más los he necesitado.

Omar Oswaldo Salazar Hurtado

## **DEDICATORIA**

Dedico este humilde trabajo a mi madre Luz, a mis hermanos Fernando y Jonathan ya que depositaron su confianza en mí cada día y que sin ellos no hubiese podido culminar esta etapa académica que no ha sido del todo fácil llena de caídas y alegrías.

No me puedo olvidar de todas aquellas personas que durante este tiempo me supieron dar ánimo para esforzarme y continuar aprendiendo nuevas cosas, sin olvidar de dónde vengo y hacia dónde voy.

Omar Oswaldo Salazar Hurtado

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se muestra el desarrollo de una investigación realizada para el modelamiento de un secador de banda para la deshidratación de alfalfa, con la finalidad de predecir el comportamiento de dicha maquina al momento de su diseño e implementación.

Las bases del proceso de deshidratación de alfalfa por medio de un secador de banda se fundamentan en estudios experimentales previamente realizados de acuerdo a un estándar, los análisis mostrados en dichos estudios dan el punto de partida para el desarrollo del modelamiento en el entorno de simulación Multiphysics de Autodesk.

Además de los resultados de análisis experimentales se hace referencia al comportamiento de lo que es un secador de banda, relacionando el comportamiento de variables físicas como la variación de temperatura y velocidad del aire de secado en el entorno de simulación de transferencia de calor y fluidos en estado inestable respectivamente del software Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

El secado de la alfalfa se lo establece a una temperatura de 393.00K a 8.4 minutos de secado para la eliminación del 70.32% de agua a condiciones iniciales de ambiente de 298.00K temperatura y 50% de humedad relativa.

El trabajo desarrollado sirve como base bibliográfica para investigaciones futuras relacionadas con el tema de deshidratación de alimentos.

## **ABSTRACT**

In this thesis shown the development of research for the modeling of a conveyor dryer for dehydration of alfalfa, with the purpose of predict the behavior of the machine at the time of design and implementation.

The bases of the dehydration process of alfalfa through a belt dryer a standard is based on experimental studies previously conducted in accordance, analyzes shown in these studies provide the starting point for the development of modeling in the environment of Autodesk Simulation Multiphysics.

Besides the results of experimental analysis referring to behavior which is a belt dryer, associated to the behavior of physical variables such as temperature variation and speed of the drying air, in the simulation environment of heat transfer and fluid unstable state respectively of Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Alfalfa drying was establishes at a temperature of 393.00K, 8.4 minutes of drying for removing water 70.32% initial conditions 298.00K ambient temperature and 50% relative humidity.

The work serves as a basis for future research bibliography related to the subject of food dehydration.

## ÍNDICE GENERAL

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	ii
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD .....	iii
CONSTANCIA .....	iv
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRAGO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE .....	v
CERTIFICADO DEL ASESOR .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
DEDICATORIA .....	viii
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	x
ÍNDICE GENERAL .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xviii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xxiv
Objetivo General .....	xxvi
Objetivos Específicos .....	xxvi
CAPITULO I .....	1
MÉTODOS Y PRINCIPIOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA .....	1
1.1 PROBLEMÁTICA .....	1
1.2 PRODUCCIÓN Y CULTIVO DE ALFALFA .....	2
1.2.1 Producción de Alfalfa .....	2
1.2.2 Cultivo de Alfalfa .....	4
1.2.3 Contenido Nutritivo de la Alfalfa .....	6
1.2.4 Deshidratación de Alfalfa .....	6
1.2.4.1 Criterios para la deshidratación de alfalfa .....	7
1.2.4.2 Nutrientes de la Alfalfa Deshidratada .....	7

1.2.4.3 Constante de secado vs longitud de los tallos de alfalfa picada .....	9
1.3 OPCIONES DE SECADO DE ALIMENTOS .....	9
1.3.1 Criterios para la Selección y Clasificación de Secadores de Banda Transportadora .....	10
1.3.1.1 Evaluación de Sistemas de Secado según Kudra & Mujumdar (2006). Handbook of Industrial Drying. ....	10
1.3.1.2 Razones para elegir secadores de banda transportadora según la Empresa Amandus Kahl. ....	10
1.3.1.3 Componentes del Secador Continúo de Banda Transportadora. ....	12
1.3.1.4 Tipos de Secadores de Banda Transportadora.....	13
1.3.1.5 Distribución del Producto en la Banda Transportadora.....	15
1.3.1.6 Dispositivos para la Alimentación de Producto en Secadores de Banda Transportadora.....	16
1.4 FUNDAMENTOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA .....	18
1.4.1 Psicrometría.....	19
1.4.1.1 Humedad Específica.....	19
1.4.1.2 Humedad Relativa .....	19
1.4.1.3 Temperatura de Bulbo Seco .....	19
1.4.1.4 Temperatura de Bulbo Húmedo .....	20
1.4.1.5 Psicrómetro.....	20
1.4.1.6 Carta Psicométrica.....	20
1.5 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUJOS CRUZADOS .	21
1.6 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL MODELAMIENTO DE UN SECADOR CONTINUO DE BANDA TRANSPORTADORA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA .....	22
1.6.1 Descripción del Proceso de Deshidratación en Secadores de Banda Transportadora. .....	22

1.6.2 Información Requerida Modelamiento de un Secador Continuo de Banda Transportadora.....	23
1.6.3 Parámetros y Condiciones que establecen el modelamiento del secador de banda para la deshidratación de alfalfa.....	24
1.6.3.1 Modelo Experimental de secado de alfalfa a temperaturas bajas según Patil, Sokhansanj, Arinze & Shoenau (1992) .....	24
1.6.3.2 Modelo Experimental de secado de alfalfa a temperaturas altas según Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005).....	27
1.6.4 Requerimientos por Parte de la Agroindustria Mastercubox S.A.....	32
1.7 CONSIDERACIONES PARA EL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR ALFALFA .....	32
1.8 VALORES ESTIMADOS PARA EL MODELO DE DESHIDRATACIÓN ALFALFA .....	33
1.8.1 Condiciones del Aire de Secado para la Deshidratación de Alfalfa.....	34
1.8.2 Condiciones para la deshidratación de alfalfa .....	34
1.8.2.1 Cantidad de Agua a extraer durante la Deshidratación de Alfalfa .....	34
1.8.3 Características para la superficie de secado de alfalfa.....	38
1.8.4 Coeficiente de transferencia de calor en la deshidratación de alfalfa.....	40
1.8.5 Coeficientes de transferencia de calor por convección .....	41
CAPÍTULO II .....	43
DESCRIPCIÓN Y VINCULACIÓN DE MULTIPHYSICS AUTODESK CON EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA.....	43
2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA DE ELEMENTOS FINITOS (FEA).....	43
2.2 ENTORNO DE DESARROLLO AUTODESK Simulation Multiphysics. ....	44
2.2.1 Fases de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics .....	44
2.2.1.1 Configuración del Modelo.....	45

	xiv
2.2.1.2 Análisis del modelo .....	45
2.2.1.3 Evaluación de Resultados.....	45
2.2.2 Interfaz de Usuario Autodesk Simulation Multiphysics.....	46
2.3 REVISIÓN DE LOS TIPOS DE ANÁLISIS EN AUTODESK SIMULATION Multiphysics INVOLUCRADOS PARA EL MODELADO DEL SECADOR DE BANDA TRANSPORTADORA .....	47
2.4 THERMAL ANÁLISIS .....	49
2.4.1 Análisis Térmico en Estado Estacionario.....	50
2.4.1.1 Ejemplo Demostrativo para el Análisis Térmico de Régimen Estacionario .....	51
2.4.2 Análisis Térmico en Estado Transitorio .....	64
2.4.2.1 Ejemplo Demostrativo para el Análisis Térmico en Estado Transitorio .....	66
CAPÍTULO III .....	76
MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR ALFALFA.....	76
3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PROCESO DESCRIPTIVO DEL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA .....	76
3.1.1 Condiciones para el modelamiento de un secador de banda para la deshidratación de alfalfa.....	76
3.2 DESARROLLO DEL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA .....	80
3.2.1 Volumen de control del secador de banda para la deshidratación de alfalfa.....	81
3.2.2 Ingreso de Coordenadas de los elementos involucrados en el modelamiento del secador de banda en el entorno de Simulación Multiphysics de Autodesk.....	82
3.3 INGRESO DE PARÁMETROS “MODELO_SECADOR.FEM” ESCENARIOS DE CONFIGURACIÓN PARA SIMULAR EL CAMBIO DE VELOCIDAD DEL FLUJO DE AIRE DE SECADO .....	89

3.4 CORRIDA DE SIMULACIONES DEL “MODELO_SECADOR.fem” PRIMER ESCENARIO EN AUTODESK SIMULATION Multiphysics 2013 PARA LOS ESPESORES DE 50, 100 y 150mm DE LECHO DE SECADO A TRES VELOCIDADES	
0.3, 0.6 y 1m/s .....	92
3.4.1 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.3m/s con el arreglo de 50mm de lecho de secado .....	93
3.4.2 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.6m/s con el arreglo de 50mm de lecho de secado .....	94
3.4.3 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 1.00m/s con el arreglo de 50mm de lecho de secado .....	95
3.4.4 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.30m/s con el arreglo de 100mm de lecho de secado .....	96
3.4.5 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.60m/s con el arreglo de 100mm de lecho de secado .....	97
3.4.6 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 1.00m/s con el arreglo de 100mm de lecho de secado .....	98
3.4.7 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.30m/s con el arreglo de 150mm de lecho de secado .....	99
3.4.8 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.60m/s con el arreglo de 150mm de lecho de secado .....	100
3.4.9 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 1.00m/s con el arreglo de 150mm de lecho de secado .....	101
3.5 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS Y SIMULACIÓN DEL SEGUNDO ESCENARIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN RÉGIMEN ESTACIONARIO PARA EL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA .....	102
3.5.1 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 50mm de lecho de secado y 0.30m/s de velocidad de secado. ....	110

3.5.2 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 50mm de lecho de secado y 0.60m/s de velocidad de secado. ....	111
3.5.3 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 50mm de lecho de secado y 1.00m/s de velocidad de secado. ....	112
3.5.4 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 100mm de lecho de secado y 0.30m/s de velocidad de secado. ....	113
3.5.5 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 100mm de lecho de secado y 0.60m/s de velocidad de secado. ....	114
3.5.6 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 100mm de lecho de secado y 1.00m/s de velocidad de secado. ....	115
3.5.7 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 150mm de lecho de secado y 0.30m/s de velocidad de secado. ....	116
3.5.8 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 150mm de lecho de secado y 0.60m/s de velocidad de secado. ....	117
3.5.9 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para un espesor de 150mm de lecho de secado y 1.00m/s de velocidad de secado. ....	118
3.5.10 Consideraciones para el cálculo de energía total basado en el Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO_SECADOR.fem” para los arreglos propuestos del lecho de secado de alfalfa de 50, 100 y 150mm. ....	119
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>124</b>

EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DE SIMUACIÓN PARA EL PROCESO DEL SECADOR DE BANDA PARA LA DESHIDRATACION DE ALFAFA .....	124
4.1 ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS DEL PRIMER ESCENARIO DE SIMULACIÓN .....	124
4.2 ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS DEL SEGUNDO ESCENARIO DE SIMULACIÓN .....	127
4.3 Análisis de la cantidad de Energía requerida para el secado de alfalfa de los lechos de secado de 50, 100 y 150mm de espesor. ....	129
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	131
CONCLUSIONES.....	131
RECOMENDACIONES .....	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Cultivo de Alfalfa .....	2
Figura 1.2 Diagrama de Flujo del Cultivo de Alfalfa .....	4
Figura 1.3 Alfalfa Deshidratada .....	7
Figura 1.4 Constante de secado vs Longitud de tallos picados de alfalfa.....	9
Figura 1.5 Sección longitudinal del secador de paso simple.....	11
Figura 1.6 Cinta transportadora del secador.....	12
Figura 1.7 Diagrama de un secador de banda transportadora de paso simple sin realimentación de aire caliente.....	13
Figura 1.8 Diagrama de un secador de banda transportadora de paso simple con realimentación de aire caliente.....	14
Figura 1.9 Diagrama de un secador multicapas de flujo cruzado .....	15
Figura 1. 10 Diagrama de un secador multicapas de flujo cruzado con realimentación .....	15
Figura. 1.11 Distribución del producto a secar no deseada (a), condiciones de alimentación del producto aceptables para el secado uniforme (b). .....	16
Figura 1.12 Alimentador de banda transportadora giratoria. ....	16
Figura 1.13 Alimentador de Capa niveladora .....	17
Figura 1.14 Alimentador de Tornillo sin Fin Giratorio.....	17
Figura 1.15 Alimentador de Chute Giratorio .....	18
Figura. 1.16 Temperatura de Bulbo seco. ....	19
Figura. 1.17 Psicrómetro .....	20
Figura 1.18 Diagrama de flujo de un secador de banda transportadora.....	23
Figura 1.19 Secador continuo de paso simple.....	24

Figura 1.20 Disminución de la velocidad de secado de una muestra completa de alfalfa aplastada a varias temperaturas y 0.3m/s de velocidad del aire de secado. ....	29
Figura 1.21 Representación Gráfica del Transporte de Alfalfa Durante el Secado .....	35
Figura 1.22 Agujeros redondos tresbolillo 60° .....	39
Figura 2.1 Ventana de inicio Autodesk Simulation Multiphysics 2013 .....	44
Figura 2.2 Interfaz de usuario Autodesk Simulation Multiphysics.....	47
Figura. 2.3 Análisis Térmico en Autodesk Simulation Multiphysics .....	49
Figura 2.4 Selección del Entorno de Análisis Térmico.....	49
Figura 2.5 Selección análisis térmico Steady – State Heat Transfer.....	50
Figura 2.6 Condiciones del Ejercicio Demostrativo para un Análisis Térmico bajo Régimen Estacionario .....	51
Figura 2.7 Selección Análisis térmico de Régimen Estacionario para el modelo.....	52
Figura 2.8 Selección del Sistema de Unidades para el entorno de trabajo.....	52
Figura 2.9 Asignación de un nombre al nuevo analisis FEA. ....	52
Figura 2.10 Selección del plano de trabajo .....	53
Figura 2.11 Selección de la geometría para la creación de partes del modelo.....	53
Figura 2.12 Asignación de coordenadas para la parte uno del modelo.....	54
Figura 2.13 Asignación de coordenadas de la parte dos del modelo .....	55
Figura 2.14 Asignación de coordenadas parte tres del modelo.....	55
Figura 2.15 Visualización de todas las partes del modelo .....	56
Figura 2.16 Mallado de las partes del modelo .....	56
Figura 2.17 Estructura de propiedades para las partes del modelo .....	57
Figura 2.18 Selección del tipo de Definición de la Parte 1 .....	58
Figura 2.19 Selección del tipo de Elemento de la Parte 1 .....	58
Figura 2.20 Ingreso de propiedades Parte 3 .....	59

Figura 2.21 Especificación de Propiedades del material para las partes 1 y 3.....	59
Figura 2.22 Visualización del proceso de selección de superficies .....	60
Figura 2.23 Asignación de radiación al modelo.....	61
Figura 2.24 Asignación de convección al flujo de la parte tres del modelo. ....	61
Figura 2.25 Asignación de una temperatura nodal inicio para el proceso iterativo. ....	62
Figura 2.26 Asignación de parámetros del modelo antes de correr la simulación.....	62
Figura 2.27 Ejecución de la simulación del ejemplo demostrativo de transferencia de calor bajo el régimen de estado estable. ....	63
Figura 2.28 Visualización del Resultado Requerido por el Análisis.....	63
Figura 2.29 Resumen de resultados para el flujo de calor .....	64
Figura 2.30 Representación gráfica del modelo para el análisis transitorio.....	66
Figura 2.31 Selección del sistema de unidades y asignación de unidades para la temperatura en el sistema métrico mks (SI) .....	67
Figura 2.32 Generación de un mallado a partir de cuatro puntos. ....	68
Figura 2.33 Proceso para seleccionar linear del modelo. ....	68
Figura 2.34 Asignación de una nueva superficie a partir de dos líneas. ....	69
Figura 2.35 Asignación del tipo de geometría al modelo 2D creado. ....	69
Figura 2.36 Asignación de propiedades material del cilindro.....	70
Figura 2.37 Selección de la superficie dos para agregar al modelo la carga de convección.....	70
Figura 2.38 Asignación de parámetros característicos de un análisis de régimen transitorio. ....	71
Figura 2.39 Corrida para la simulación del modelo en 2D .....	71
Figura 2.40 Simulación del modelo en 2D.....	72
Figura 2.41 Temperatura del nodo central de la cara circular del modelo.....	72

Figura 2.42 Selección del mallado 2D del modelo. ....	73
Figura 2.43 Modelo 3D para el modelo del cilindro. ....	73
Figura 2.44 Asignación del tipo de elemento para el modelo. ....	74
Figura 2.45 Resumen de la simulación en 3D del modelo. ....	74
Figura 2.46 Temperatura del nodo de la cara circular del modelo en 3D. ....	75
Figura 3.1 Representación de un secador de banda transportadora de paso simple sin realimentación de aire caliente. ....	77
Figura 3.2 Diagrama de la alimentación por banda transportadora al secador de banda. ....	77
Figura 3.3 Modelo en 2D Secador de Banda .....	81
Figura 3.4 Configuración del entorno de simulación .....	82
Figura 3.5 Configuración de unidades del Modelo .....	83
Figura 3.6 Creación de carpetas para el modelamiento del secador de banda transportadora. ....	83
Figura 3.7 Ingreso de las coordenadas primer elemento del lecho de secado. ....	84
Figura 3.8 Selección y distribución elementos del lecho de secado .....	85
Figura 3.9 Cambio de atributos de los elementos del lecho de secado de 50mm .....	85
Figura 3.10 Asignación de la tercer dimensión al flujo de aire. ....	87
Figura 3.11 Configuración del mallado de la cámara de secado. ....	88
Figura 3.12 Cambio de Unidades para asignar propiedades del flujo de aire .....	88
Figura 3.13 Cambio de los valores de la viscosidad dinámica y densidad del flujo de aire .....	89
Figura 3.14 Ingreso de valores para la velocidad del aire de secado .....	90
Figura 3.15 Asignación de la salida del aire de secado. ....	91

Figura 3.16 Selección para la configuración de parámetros del análisis del primer escenario.....	91
Figura 3.17 Asignación de valores en la tabla de parámetros de análisis del primer escenario.....	92
Figura 3.18 Simulación del escenario uno, a $v = 0.30\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 50mm. ....	94
Figura 3.19 Simulación del escenario uno, $v = 0.60\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 50mm.	95
Figura 3.20 Simulación del escenario uno, $v = 1.00\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 50mm.	96
Figura 3.21 Simulación del escenario uno, $v = 0.30\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 100mm. ....	97
Figura 3.22 Simulación del escenario uno, $v = 0.60\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 100mm. ....	98
Figura 3.23 Simulación del escenario uno, $v = 1.00\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 100mm. ....	99
Figura 3.24 Simulación del escenario uno, $v = 0.30\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 100mm. ....	100
Figura 3.25 Simulación del escenario uno, $v = 0.60\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 150mm. ....	101
Figura 3.26 Simulación del escenario uno, $v = 1.00\text{m/s}$ y arreglo del lecho = 150mm. ....	102
Figura 3.27 Ventana de opciones para generar o abortar un escenario de simulación en Autodesk Simulation Multiphysics 2013 .....	103
Figura 3.28 Activación de partes desactivadas en el escenario uno para la configuración parámetros al lecho de secado.....	104
Figura 3.29 Configuración de parámetros para la definición del elemento para el lecho el lecho de secado en el segundo escenario.....	105
Figura 3.30 Configuración de parámetros para especificar el material representativo del lecho de secado.....	105
Figura 3.31 Configuración de parámetros para especificar las condiciones del aire de secado para el régimen estacionario de transferencia de calor.....	106
Figura 3.32 Configuración de parámetros para especificar las condiciones de los elementos que conforman el aislante de la cámara de secado.....	106

Figura 3.33 Selección de Opciones para seleccionar superficies y asignar cargas al modelo.....	107
Figura 3.34 Configuración de la superficie controlada por temperatura.....	107
Figura 3.35 Configuración de la carga de flujo convectivo .....	108
Figura 3.36 Importación del archivo del escenario uno .....	108
Figura 3.37 Selecciones dadas para una superficie .....	109
Figura 3.38 Asignación de la temperatura nodal inicial para el modelo en el escenario dos .....	110
Figura 3.39 Resultado final del escenario dos para un lecho de 50mm y 0.30m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	111
Figura 3.40 Resultado final del escenario dos para un lecho de 50mm y 0.60m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	112
Figura 3.41 Resultado final del escenario dos para un lecho de 50mm y 1.00m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	113
Figura 3.42 Resultado final del escenario dos para un lecho de 100mm y 0.30m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	114
Figura 3.43 Resultado final del escenario dos para un lecho de 100mm y 0.60m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	115
Figura 3.44 Resultado final del escenario dos para un lecho de 100mm y 1.00m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	116
Figura 3.45 Resultado final del escenario dos para un lecho de 150mm y 0.30m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	117
Figura 3.46 Resultado final del escenario dos para un lecho de 150mm y 0.60m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	118
Figura 3.47 Resultado final del escenario dos para un lecho de 150mm y 1.00m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor .....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla: 1.1 Efecto de la etapa de corte en el cultivo de alfalfa.....	3
Tabla: 1.2 Profundidad del suelo y porcentaje de producción de la alfalfa .....	5
Tabla 1.3.- Contenido nutritivo de la Alfalfa .....	6
Tabla 1.4 Composición de materia seca en hojas y tallos de la alfalfa .....	8
Tabla 1.5 Contenido proteico y valor energético de la alfalfa deshidratada .....	8
Tabla 1.6 Características de las muestras utilizadas del estudio .....	27
Tabla 1.7 Combinaciones Temperatura y Velocidad del aire de secado .....	28
Tabla 1.8 Parámetros de secado y composición de los forrajes de alfalfa. ....	30
Tabla 1.9 Constantes de secado (min-1) y R2 valores de diferentes componentes en diferentes temperaturas de secado.....	30
Tabla 1.10 Condiciones de secado de acuerdo al estudio Drying and Quality characteristics of Different Components of Alfalfa. ....	31
Tabla 1.11 Condiciones base del aire para el secado .....	34
Tabla 1.12 Balance del contenido de agua a extraer durante el secado .....	37
Tabla 1.13 Cantidad de agua a evaporar durante el secado de Alfalfa .....	38
Tabla 1.14 Disponibilidad de chapas perforadas de 3mm .....	39
Tabla 1.15 Dimensiones de la chapa perforada destinada para la construcción de la superficie del secador para la deshidratación de alfalfa. ....	40
Tabla 1.16 Propiedades del aire a 1atm y 393,15 K.....	40
Tabla 1.17 Coeficientes de transferencia de calor por convección .....	42
Tabla 2.1 Detalle de los diferentes tipos de Análisis de desarrollo que tiene Autodesk Simulation Multiphysics 2013 .....	48
Tabla 2.2 Aplicación de Cargas en Estado estacionario de Transferencia de calor.....	50
Tabla 2.3 Tabla Representativa del Estado Transitorio de Transferencia de Calor.....	65

Tabla 2.4 Cuadro comparativo de la temperatura del nodo #21 del modelo. ....	75
Tabla 3.1 Comportamiento de combinaciones para el modelamiento del secador de banda transportadora.....	80
Tabla 3.2 Coordenadas internas de la cámara de secado .....	86
Tabla 3.3 Coordenadas del aislante térmico de la cámara de secado.....	86
Tabla 3.4 Detalle del número de nodos y elementos involucrados para las simulaciones de los tres espesores del escenario uno. ....	93
Tabla 3.5 Contenido de Agua a Extraer por Arreglo .....	122
Tabla 3.6 Resultados obtenidos de las simulaciones realizadas.....	123
Tabla 4.1 Valores de la Velocidad a la Salida del Volumen de Control.....	125
Tabla 4.2 Comportamiento de la Velocidad al Contacto con el Lecho de Secado .....	126
Tabla 4.3 Cambio de la temperatura ensayos de secado. ....	127
Tabla 4.4 Condiciones de Temperatura del Lecho de Secado. ....	129
Tabla 4.5 Calor de secado absorbido por la Alfalfa de acuerdo a los diferentes tipos de arreglo.....	130

## **Objetivo General**

Desarrollar un modelo de secador basado en el uso de Multiphysics Autodesk para deshidratar alfalfa de la Agroindustria MASTERCUBOX S.A.

## **Objetivos Específicos**

- Identificar los parámetros que intervienen en el proceso de deshidratación de alfalfa.
- Determinar las condiciones iniciales que rigen el proceso de la deshidratación de alfalfa tanto para el aire como para la alfalfa.
- Emplear el uso del programa Autodesk Simulation Multiphysics para simular el proceso de deshidratación de alfalfa.

# **CAPÍTULO I**

## **MÉTODOS Y PRINCIPIOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA**

En este capítulo se da a conocer las bases teóricas que fundamentan el cultivo de alfalfa, condiciones del aire de secado; con la finalidad de obtener los parámetros necesarios para la deshidratación de alfalfa.

### **1.1 PROBLEMÁTICA**

El desarrollo de los procesos de deshidratación ha llevado al mejoramiento de técnicas que contribuyen con el aprovechamiento energético y vida útil de los alimentos. Uno de los procesos de deshidratación es el secado por aire caliente, siendo una de las actividades industriales que utiliza mayor consumo energético.

La deshidratación por aire caliente ha sido empleada con el fin de preservar la calidad y vida útil de los alimentos. Actualmente en la provincia de Imbabura los cultivos de alfalfa son de gran demanda pero existe la situación de que no hay un debido uso con este producto que sirve de alimento para el ganado de leche entre otros.

La agroindustria “MASTECUBOX S.A.” Ha decidido desarrollar un Secador de banda para deshidratar alfalfa, y para ello se ha planteado el modelamiento utilizando Autodesk Simulation Multiphysics con la finalidad de obtener mejores resultados relacionados la optimización de recursos y consumo energético.

## 1.2 PRODUCCIÓN Y CULTIVO DE ALFALFA

Es una planta que se origina en Asia Occidental conocida hace más de 2500 años. Su nombre científico es (*Medicago sativa*), se la considera como la reina de las forrajeras por su alto contenido en proteínas, vitaminas y minerales; ayuda a mejorar el metabolismo en animales rumiantes, Albán (Citador por Mora, J. 2005).



**Figura 1.1 Cultivo de Alfalfa**

### 1.2.1 Producción de Alfalfa

Al mejorar el manejo de esta planta que se adapta a cualquier condición climática se aumenta el número de animales lecheros por hectárea, lo que refleja un incremento en la producción de leche y por ende los ingresos percibidos de la región que se dedica a esta labor (Albán, 1992).

En general el cultivo de alfalfa sirve de alimento para toda clase de ganado como: bovino, porcino, vacuno, entre otros. Por medio de balanceado la alfalfa es consumida por las aves.

Leucina, lisina, triptófano, metionina, fenilalanina son aminoácidos esenciales de las proteínas que contiene la alfalfa y esto hace que sea un producto de gran calidad apto para el consumo animal y humano (Mora, J 2005).

La producción de alfalfa tiene un rendimiento de 40 a 80 toneladas de forraje verde por hectárea en 4 a 8 cortes, si el cultivo se lo realiza en la región inter andina la cantidad de cortes se ve

afectada por la latitud, de acuerdo a la Figura 1.1 se tiene un ejemplo del efecto del rendimiento en toneladas de alfalfa en dependencia del estado de madurez de la alfalfa.

**Tabla: 1.1 Efecto de la etapa de corte en el cultivo de alfalfa**

Estado de madurez	Hojas (%)	P.C. (%)	ADF (%)	NDF (%)	VRF (%)	Dig. (%)	Rendimiento ton de MS/ha
Botón	> 40	>19	< 30	< 40	> 140	65	1.8
Inicio de floración	30-40	16-19	30-35	40-45	124-140	63	2.2
50% de floración	20-29	13-15	36-40	46-50	101-123	61	2.2
100% de floración	< 30	< 13	> 40	> 50	< 100	59	2.1

Fuente: Joffre, Mora, Proyecto de Grado, ESPE, Facultad de Ciencias Agropecuarias – IASA, Sangolquí Ecuador 2005, Página 35.

Benítez (Citado por Mora, J. 2005) muestra que las provincias con mayor producción de alfalfa en el Ecuador son:

- Chimborazo
- Cotopaxi
- Imbabura
- Pichincha
- Tungurahua
- Carchi
- Bolívar
- Cañar
- Azuay
- Loja

Sánchez & Sandoval (Citado por Mora, J. 2005), estudiaron la adaptación de 14 variedades de alfalfa en la parroquia Salinas de Ibarra provincia de Imbabura.

Las variedades en estudio fueron, “El único”, “Thor”, “Diablo Verde”, “Lahontan L255”, “Caliente”, “Serance 713”, “Gladiador”, “Mesa”, “Sirsa”, “Dominor”, “Joaquin II” procedentes

de Estados Unidos; “Mireille”, “Euver”, “Elga” de origen francés y “Alta Sierra” procedente del Perú. Los resultados obtenidos, indican que en la localidad las variedades con mayor rendimiento expresado en TM/ ha (Toneladas métricas por hectárea) de materia verde son “Diablo” con 18.51, “El Único” con 16.11 y “Caliente” con 15.09, hay que mencionar que el estudio de igual manera se realizó también en Guayllabamba y Samanga Ambato.

### 1.2.2 Cultivo de Alfalfa

El cultivo de alfalfa es de gran importancia siendo el factor principal que determina la calidad final del producto el cual será destinado como alimento directo o materia prima para la producción de productos deshidratados y balanceados para animales, a continuación se muestra mediante el diagrama de la Figura 1.2 el proceso necesario para el cultivo de la alfalfa.



**Figura 1.2 Diagrama de Flujo del Cultivo de Alfalfa**

Una vez conocido el terreno se debe saber que variedad de alfalfa es más recomendable; esto depende de la región. Por lo general este tipo de forrajes se adaptan a toda región ya que puede persistir en tiempos de sequía, en la Tabla 1.2 se muestra el porcentaje de producción de alfalfa en consideración de la profundidad del suelo.

**Tabla: 1.2 Profundidad del suelo y porcentaje de producción de la alfalfa**

Profundidad del Suelo (cm)	Producción (%)
Mayor de 60	100
De 40 a 60	80
De 30 a 40	77

Fuente: Espinoza, J & Ramos, J (2012).

La siembra se la puede desarrollar en cualquier época del año es mejor cuando se tiene temperaturas de clima bajas ya que la maleza se reduce. Para la siembra es preferible usar sembradoras de granos pequeños “Brillon” bajo el procedimiento como se detalla a continuación: Surcar el terreno el que le ayudara a proveer a la planta de agua, con la ayuda de una sembradora ya mencionada se obtiene una buena distribución y profundidad adecuadas para una pronta germinación de las semillas de alfalfa, cuando se tiene una buena calidad de alfalfa se utiliza de 30 a 35 Kg de semilla por hectárea.

La fertilización juega un papel importante para ello es recomendable utilizar 40 Kg de nitrógeno y 90 de Fosforo por hectárea en la siembra, durante la producción es útil fertilizar cada seis meses con 90 Kg de fosforo por hectárea.

El riego debe de ser ligero durante el periodo de germinación, conforme crece la plata y dependiendo la humedad del suelo es importante regar el cultivo después del corte en un promedio de cada 15 días.

El control de plagas y malezas es recomendable ya de no existir un buen control no se obtendrá un producto de buena calidad.

La cosecha es recomendable cuando la alfalfa tenga entre 5 a 10 % de floración o ante la presencia de rebrotes entre los tamaños de 5 a 7 centímetros.

Para tener un buen rendimiento de producción la cosecha se la debe realizar cada 25 a 28 días durante la primavera y verano; en otoño cada 30 a 35 días y en invierno cada 45 días.

La cosecha a nivel industrial se debe realizar con máquinas ya que mejoran la calidad del producto, actualmente hay máquinas que al momento de la cosecha la alfalfa es picada; esto ayuda a uniformizar la densidad del producto al momento del secado.

### 1.2.3 Contenido Nutritivo de la Alfalfa

El contenido nutritivo de la alfalfa se muestra en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3.- Contenido nutritivo de la Alfalfa**

<b>Composición nutricional</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Matéria seca	%	38,00
NDT	%	21,00
Energía digestible	Mcal/kg	0,96
Energía metabolizable	Mcal/kg	0,80
Proteína (TCO)	%	5,90
Calcio (TCO)	%	0,52
Fósforo total (TCO)	%	0,12
Grasa (TCO)	%	1,20
Ceniza (TCO)	%	3,00
Fibra (TCO)	%	11,40

Fuente: Mundo-pecuario.com (Citado por Andrade, Y. 2010).

### 1.2.4 Deshidratación de Alfalfa.

La alfalfa deshidratada como materia prima en la alimentación de ganado tiene como destino final para la producción de henos o pellets, en la Figura 1.3 se muestra henos de alfalfa deshidratada.



**Figura 1.3 Alfalfa Deshidratada**

Fuente: Grupo Osés

#### ***1.2.4.1 Criterios para la deshidratación de alfalfa***

La deshidratación de alfalfa, en comparación con el secado natural (henificación), reduce las pérdidas del valor nutritivo de hojas y tallos. Es importante el control de humedad y nivel de contaminación del suelo siendo la base para obtener un producto de buena calidad.

La alfalfa contiene alrededor de un 50% de pared celular y una composición equilibrada de la fibra (8% pectinas, 10% hemicelulosas, 25% celulosa y 7% lignina).

Al someter a la alfalfa a un pre secado se elimina una parte de humedad antes de la deshidratación se consigue un gran ahorro energético; tomando en cuenta de un 30% de humedad existente después del secado previo, A.E.F.A. (2012).

La etapa inicial es la de pre secado en el campo logrando reducir la humedad cerca de un 45%, luego la materia prima se la transporta hacia la planta de secado donde la alfalfa es secada mecánicamente hasta conseguir los niveles óptimos de almacenamiento y embalado, ANSO ALFALFAS (2011).

#### ***1.2.4.2 Nutrientes de la Alfalfa Deshidratada***

La alfalfa contiene gran contenido de proteínas, minerales y vitaminas, su nivel energético se lo relaciona con su valor de nitrogenado.

Los altos niveles de  $\beta$  – *caroteno* (precursores de la vitamina A) influyen en la reproducción de bovino. A continuación en la Tabla 1.4 se indica el contenido de nutrientes de la alfalfa después de ser cosechada.

**Tabla 1.4 Composición de materia seca en hojas y tallos de la alfalfa**

%	HOJAS	TALLOS
Proteína bruta	24	10.7
Grasa bruta	3.1	1.3
Extracto no nitrogenado	45.8	37.3
Fibra bruta	16.4	44.4
Cenizas	10.7	6.3

Fuente: <http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/alfalfa3.htm>

En la Tabla 1.5 se muestra el contenido proteico y valor energético para la alfalfa deshidratada de acuerdo a, (Journet, 93).

**Tabla 1.5 Contenido proteico y valor energético de la alfalfa deshidratada**

%PB (s.s.s.)	UFL (Kg ms)	UFV (Kg ms)
17	0,75	0,64
19	0,81	0,71
21	0,88	0,79
23	0,95	0,87
25	1,02	0,96

Fuente: <http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/alfalfa3.htm>

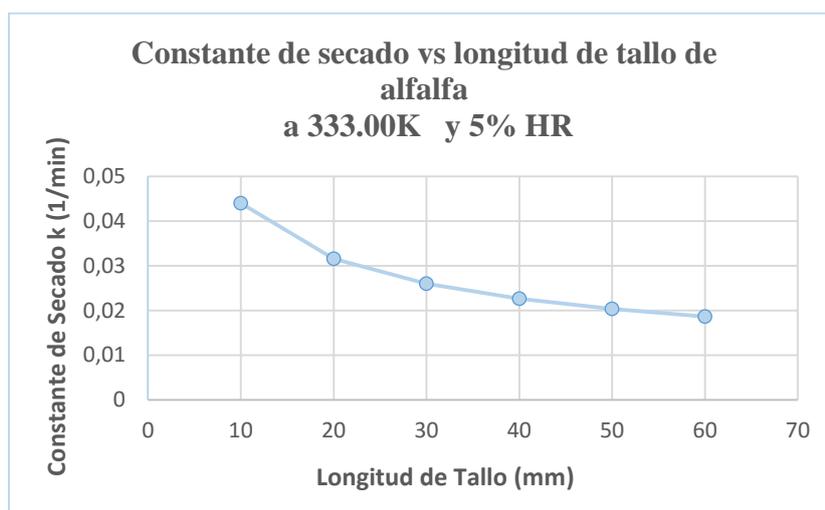
**PB (s.s.s.):** Proteína bruta sobre la sustancia seca.

**UFL:** Energía neta para lactación.

**UFV:** Energía neta para la producción de carne.

### 1.2.4.3 Constante de secado vs longitud de los tallos de alfalfa picada

De acuerdo a la Figura 1.4 se tiene que la longitud de los tallos de alfalfa picada afecta a la velocidad de secado por lo que se recomienda picar en trozos lo más pequeños posible según, Patil, Sokhansanj, Arinza & Schoenau (1992).



**Figura 1.4 Constante de secado vs Longitud de tallos picados de alfalfa**

Fuente: Patil, Sokhansanj, Arinza & Schoenau (1992), Thin layer drying of components of fresh alfafa, p.3

La constante de secado se reduce conforme aumenta el tamaño de los tallos cortados de alfalfa, es recomendable un corte promedio de 50mm.

## 1.3 OPCIONES DE SECADO DE ALIMENTOS

Existen varios métodos de secado para alimentos como son: secados por aire caliente, de vacío, secado en tambor, mediante pulverización, congelación entre otros. Conforme a la aparición de nuevas tecnologías se han desarrollado mejores alternativas, por múltiples razones a nivel industrial se prefiere métodos de secado convencional.

La familiaridad, modo de construcción, funcionamiento, son razones por las que el cliente prefiere usar tecnologías de bajo riesgo; existen algunas nuevas tecnologías que proveen de un mejor rendimiento de costos de producción inicial relativamente altos.

### **1.3.1 Criterios para la Selección y Clasificación de Secadores de Banda Transportadora**

A continuación se muestra información relacionada con el diseño de secadores de banda transportadora, para ello se da a conocer las bases principales que determinan el tipo de secador a usar tomando en cuenta factores importantes como tamaño, capacidad de carga, capacidad de secado, tiempo de duración del secado entre otras características necesarias para el uso de este tipo de secadores.

#### ***1.3.1.1 Evaluación de Sistemas de Secado según Kudra & Mujumdar (2006). Handbook of Industrial Drying.***

Se mencionan los aspectos más importantes de evaluación de sistemas de secado como:

- Modo de funcionamiento del secador (por lotes o continuo).
- Presión a la que se va trabajar (vacío, atmosférica y alta presión).
- Modo de transferencia de calor (conducción, convección, radiación, calentamiento dieléctrico y la combinación de los diferentes modos).

Estado de secado del producto (estacionario, en movimiento, agitado, fluidizado y atomizado).

El tiempo de duración del secado (corto si es por debajo de 1 minuto, medio si está entre 1-60 min o largo si supera los 60 min).

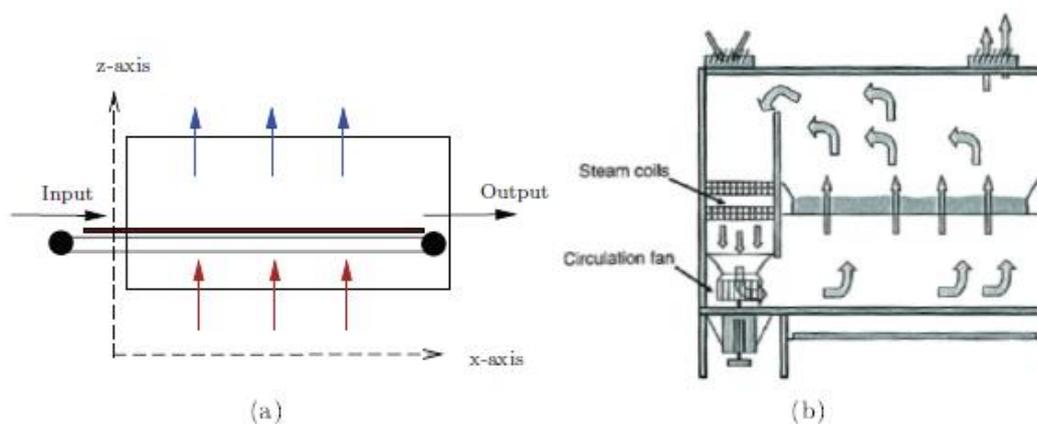
#### ***1.3.1.2 Razones para elegir secadores de banda transportadora según la Empresa Amandus Kahl.***

El movimiento no es individual de partículas, gránulos, pellets, etc. Debido a la baja carga mecánica del producto y adecuado para bajas temperaturas de entrada menores de 353.00K.

A los secadores de banda transportadora también se los conoce como secadores de cinta – túnel, son secadores continuos con circulación de aire forzado a través del material que se traslada sobre un transportador, tal como se muestra en la Figura 1.5 (a).

El producto se desplaza a una velocidad fijada por el tiempo de secado; el medio de transporte suele ser de malla metálica entrelazada o de láminas de acero perforadas y abisagradas, así logrando un secado continuo.

De acuerdo como se indica en la Figura 1.5 (b); El gas de secado atraviesa el producto para extraer la humedad interna del producto a secar, sea hacia arriba o hacia abajo



**Figura 1.5 Sección longitudinal del secador de paso simple**

(a) y Sección transversal (b). Fuente: (Tord, 2010). Modeling and Model Predictive Control of a Conveyor – Belt Dryer Applied to the Drying of Fish Feed, p. 6

El producto húmedo se carga en un extremo del transportador, en capas a partir de 10 cm de espesor de acuerdo a las características que requiera el sistema por lo general está hecho para productos donde el orden de partícula está entre 1 a 50mm de diámetro de rango.

Generalmente en un proceso de secado de varias etapas, se tiene en la primera sección del equipo de secado, el aire caliente atraviesa perpendicularmente el lecho del producto en sentido ascendente, mientras que en las proximidades del extremo de descarga el aire caliente circula en sentido descendente con el fin de evitar el arrastre de las partículas finas del producto.

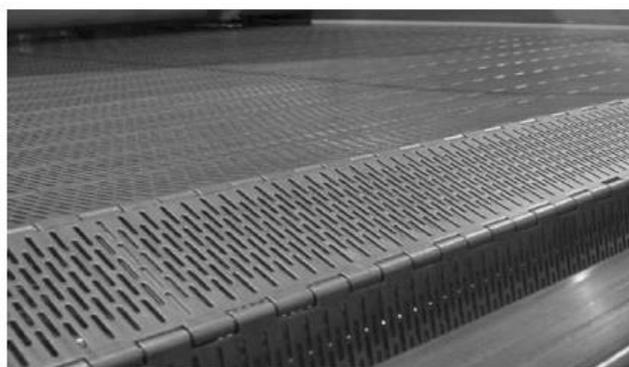
El secado de un producto puede dividirse en dos incluso en tres secciones independientes de forma que puede establecerse en cada una de las condiciones de secado diferentes.

Los tiempos de secado para este tipo de secadores oscila entre 5 a 240 minutos, existe el caso en el cual debido a la cantidad de producto a deshidratar se tiene que establecer tiempos de secado mayores y por ende existe un aumento en el precio de compra de los equipos.

Existen secadores que constan de varios transportadores logrando así disminuir las dimensiones de la máquina para un mayor rendimiento térmico y uniformidad en la calidad del producto final, (MAUPOEY, 2001).

### ***1.3.1.3 Componentes del Secador Continúo de Banda Transportadora.***

El producto es transportado a lo largo de los secadores de banda; para ello se requiere un sistema de transporte sumamente fuerte como para soportar la carga del producto y funcionar continuamente durante años con un mantenimiento mínimo. El área de secado como se indica en la Figura 1.6 debe ser abierta lo suficiente para permitir que el aire pase a través del producto, pero al mismo tiempo, las aberturas deben ser lo suficientemente pequeña para contener el producto en el lecho, (Mujumdar, 2006).



**Figura 1.6 Cinta transportadora del secador**

Fuente: (Mujumdar, 2006). Handbook of Industrial Drying, p. 437

Las placas de paso que conforman la cinta transportadora son normalmente de 100 a 300mm de ancho en la dirección de desplazamiento y de 1m a 4m de ancho a través de la máquina.

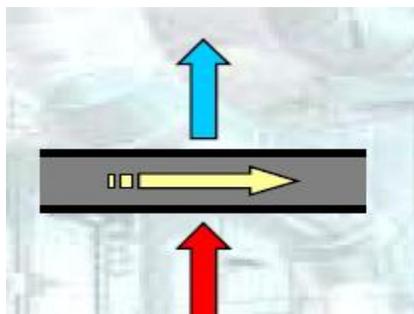
Las perforaciones de la cinta son redondas o ranuras que dependen del tamaño de partícula del producto a transportar. La banda transportadora se mueve por medio de cadenas que se ubican a los extremos del secador. Normalmente constan de un sistema de calentamiento y extracción de aire controlado por un panel de control dependiendo el tiempo de retención del producto dentro el secador.

#### ***1.3.1.4 Tipos de Secadores de Banda Transportadora.***

Los secadores de este tipo se diferencian de acuerdo al número de bandas transportadoras, la mayoría con multicapas de secado, facilitando la reutilización del aire de secado.

Comercialmente existe varias marcas de secadores, son del tipo modular facilitando su uso dependiendo del producto a secar como también adecuados para un aumento de producción a nivel industrial. De acuerdo a los diseños de la empresa Amandus Kahl se muestra algunos diagramas de secadores.

Los secadores de paso simple de acuerdo a la Figura 1.7, son normalmente para secar productos en los que el tiempo de retención es sumamente corto y no requiere la recirculación del aire de secado.

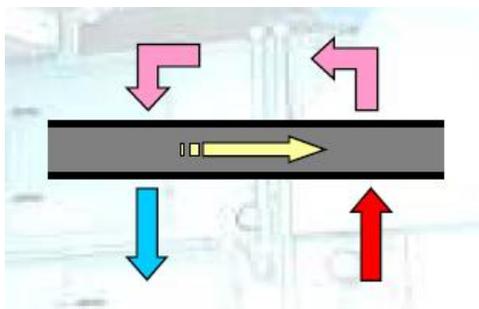


**Figura 1.7 Diagrama de un secador de banda transportadora de paso simple sin realimentación de aire caliente.**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

Los secadores de flujo cruzado con realimentación del aire de secado como se esquematiza en la Figura 1.8, optimizan el consumo de energía. Se realiza con cambios de sentido de flujo de

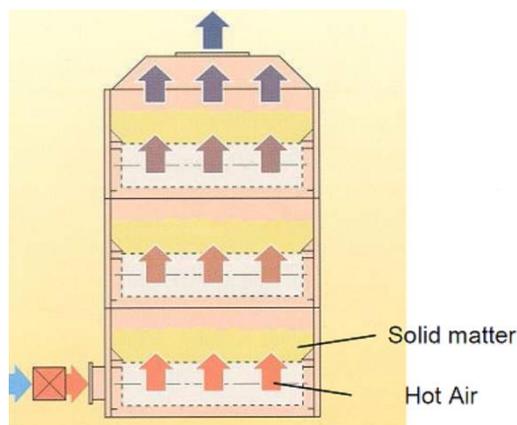
aire dependiendo del tamaño del producto logrando así evitar arrastres de partículas y mantenimiento de equipos.



**Figura 1.8 Diagrama de un secador de banda transportadora de paso simple con realimentación de aire caliente.**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

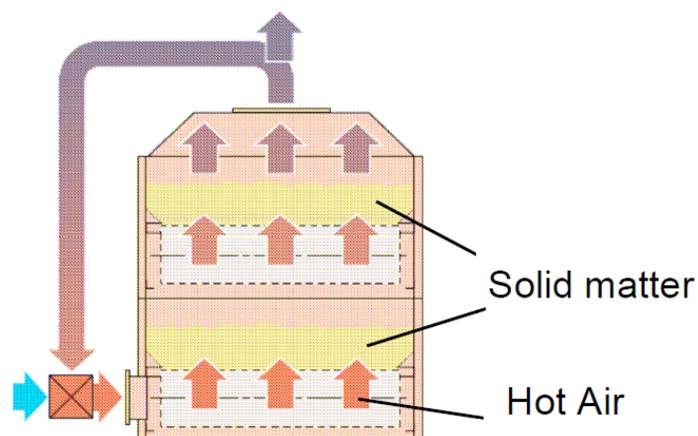
Los secadores de múltiples capas de flujo cruzado como se muestra en la Figura 1.9, son secadores que utilizan un flujo de aire caliente para secar varias capas de producto logrando así reducir costes en equipos, dependiendo el producto y calidad de secado que se requiera obtener. El flujo del material a secar se alimenta desde la parte superior de un extremo del secador que sigue la trayectoria de las bandas que van bajando hasta llegar al otro extremo inferior en dependencia del contenido de humedad final del producto.



**Figura 1.9 Diagrama de un secador multicapas de flujo cruzado**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

El secador de flujo atravesado con re alimentación de aire caliente como el de la Figura 1.10, tiene la característica de reducir el número de emisiones ya que está destinado para productos de alto contenido de humedad y elevadas temperaturas de secado final, como son los pellets de madera.



**Figura 1.10 Diagrama de un secador multicapas de flujo cruzado con realimentación**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

### ***1.3.1.5 Distribución del Producto en la Banda Transportadora***

Como se puede ver en la Figura 1.11, el producto para que sea deshidratado uniformemente a lo largo del secador debe ser distribuido por igual ya que al no ocurrir esto, el producto final no tendrá la aceptación deseada de contenido de humedad de todo el producto.



**Figura. 1.11 Distribución del producto a secar no deseada (a), condiciones de alimentación del producto aceptables para el secado uniforme (b).**

Fuente: (Tord, 2010). Modeling and Model Predictive Control of a Conveyor – Belt Dryer Applied to the Drying of Fish Feed, p. 7

### ***1.3.1.6 Dispositivos para la Alimentación de Producto en Secadores de Banda Transportadora.***

Existen varias formas de alimentación como son de caja giratoria para productos insensibles, de llenado masivo con capas niveladoras de productos insensibles de baja capa de secado, de chute giratorio para productos sensibles, de banda giratoria para productos sensibles y pegajosos y de tornillo sin fin giratorio para productos insensibles que necesitan estar espaciados.

Los alimentadores de banda transportadora giratoria como se muestra en la Figura 1.12, normalmente utilizan una banda como su nombre mismo lo dice, constan de un motor que hace girar la banda a lo ancho del secador para lograr una alimentación uniforme al secador, manteniendo una velocidad constante de la banda de acuerdo al espesor de producto que se requiera extender a lo largo del secador de banda.



**Figura 1.12 Alimentador de banda transportadora giratoria.**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

Los alimentadores de capa niveladora como se indica en la Figura 1.13, normalmente utilizan una especie de tolva al ingreso del secador de banda, tienen un nivel regulable que determina el espesor del producto y con la ayuda del avance de la banda transportadora del secador se distribuye el producto de manera uniforme a lo largo del área de secado.



**Figura 1.13 Alimentador de Capa niveladora**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

Los alimentadores de tornillo sin fin giratorio como el de la Figura 1.14 usan una tolva y un tornillo sin fin que gira con la ayuda de un motor, el paso y velocidad del tornillo sin fin, determinan el espesor del producto que ingresa al secador.



**Figura 1.14 Alimentador de Tornillo sin Fin Giratorio**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

Los alimentadores de chute giratorio como el de la Figura 1.15, utilizan una especie de canal que dependiendo su llenado y giro logran distribuir el producto en el secador de una forma irregular, útil para el secado de alimentos que requieran estar espaciados durante el proceso de secado.



**Figura 1.15 Alimentador de Chute Giratorio**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

## **1.4 FUNDAMENTOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA**

En el estudio de los secadores de banda transportadora, la transferencia de calor por convección juega un papel importante ya que al estar en contacto el producto con la corriente de aire caliente se está transmitiendo calor y como resultado de este proceso el contenido de humedad del producto disminuye; simultáneamente ocurriendo dos procesos:

- 1.- Transferencia de energía, por lo general como calor que se extrae del lecho de secado la humedad existente hacia el exterior de la cámara.
- 2.- Transferencia de la humedad interna a la superficie del sólido para luego ser evaporada durante el primer proceso.

La remoción de vapor de agua de la superficie del material depende de las condiciones externas;

Cuando el producto está saturado con la humedad, el flujo de la humedad interna es tan alta que toda la superficie del sólido está cubierta con agua. Este período se denomina el período de secado a *velocidad constante* y lo que caracteriza a este período como primer proceso.

Dominante la velocidad de secado del sólido, el contenido de humedad de los sólidos disminuye así dando lugar al segundo proceso, (Tord, 2010).

### **1.4.1 Psicrometría**

Se conoce como Psicrometría a la ciencia encargada de estudiar las propiedades del aire atmosférico, normalmente está conformado por una mezcla de aire seco y vapor de agua.

#### ***1.4.1.1 Humedad Específica***

Se considera como humedad específica a la cantidad de gramos de vapor de agua contenidos en un kilogramo de aire seco.

#### ***1.4.1.2 Humedad Relativa***

Se denomina como humedad relativa a la relación porcentual de la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire estimada, con referencia a la cantidad de vapor de agua que tendría esa misma masa de aire saturada en las condiciones de presión y temperatura.

#### ***1.4.1.3 Temperatura de Bulbo Seco***

Como se indica en la Figura 1.16, un termómetro que indica la temperatura en donde el bulbo de este se mantiene seco en el instante de medición.



**Figura. 1.16 Temperatura de Bulbo seco.**

Fuente: [http:// www.experimentosfaciles.com](http://www.experimentosfaciles.com)

#### ***1.4.1.4 Temperatura de Bulbo Húmedo***

Es la temperatura que indica un termómetro cuyo bulbo se encuentra recubierto con un paño humedecido con agua y expuesto a una corriente de aire.

#### ***1.4.1.5 Psicrómetro***

Es un instrumento como el que se observa en la Figura 1.17 que sirve para determinar las propiedades físicas de una masa de aire húmedo, consta de dos termómetros idénticos en referencia a su graduación y precisión; El bulbo de uno de los termómetros está recubierto con un paño mojado en agua denominado termómetro de bulbo húmedo.



**Figura. 1.17 Psicrómetro**

Fuente: [http:// www.experimentosfaciles.com](http://www.experimentosfaciles.com)

#### ***1.4.1.6 Carta Psicométrica***

En el Anexo A, se muestra las propiedades intensivas del aire, elaborado para temperaturas normales suficientes para el acondicionamiento de aire y para la presión normal de 760mm de Hg. Las variables que constituyen la carta psicométrica son:

Humedad específica (he).

Humedad relativa (HR).

Temperatura de Bulbo Seco (TBS).

Temperatura de Bulbo Húmedo (TBH).

Punto de Rocío (PR).

Entalpia, o contenido total de calor (Ht).

Volumen específico (Ve).

## **1.5 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUJOS CRUZADOS**

Cuando existe la transferencia de materia y de calor, el mecanismo de secado depende de la naturaleza de los sólidos y del método de contacto entre los sólidos y el gas, (McCabe, Smith & Marriot, 1991, p. 841). Se considera las condiciones de secado que son constantes cuando la temperatura, humedad, velocidad y dirección del flujo de aire a través del sólido son constantes, más no los factores de sólidos en proceso de secado como lo es el contenido de humedad que cambia conforme varía el tiempo, variable conocida como velocidad de secado que tiene un comportamiento inicial ascendente mientras se produce el calentamiento de sólidos hasta encontrar la temperatura de vaporización para tener una forma lineal donde se produce el periodo de velocidad constante.

Un periodo de velocidad real constante se considera cuando la temperatura de la superficie adopta la temperatura de bulbo húmedo teniendo en cuenta que no exista recirculación de calor producida ya sea por radiación o conducción a través del sólido.

El coeficiente de transferencia de calor generalmente se calcula a partir de la diferencia entre la temperatura del aire de secado y la temperatura de la superficie de contacto.

El coeficiente de transferencia de calor para flujos cruzados se obtiene a partir de la ecuación (1.1).

$$\frac{h_y D}{k} = 1.17 Re^{0.585} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1.1)$$

Donde,

$h_y$ : Coeficiente de transferencia de calor para flujos cruzados ( $W/m^2 \cdot K$ ).

$D_p$ : Diámetro de las partículas involucradas en el proceso (m).

$k$ : Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ ).

$Re$ : Numero de Reynolds

$Pr$ : Numero de Prandtl.

## **1.6 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL MODELAMIENTO DE UN SECADOR CONTINUO DE BANDA TRANSPORTADORA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA**

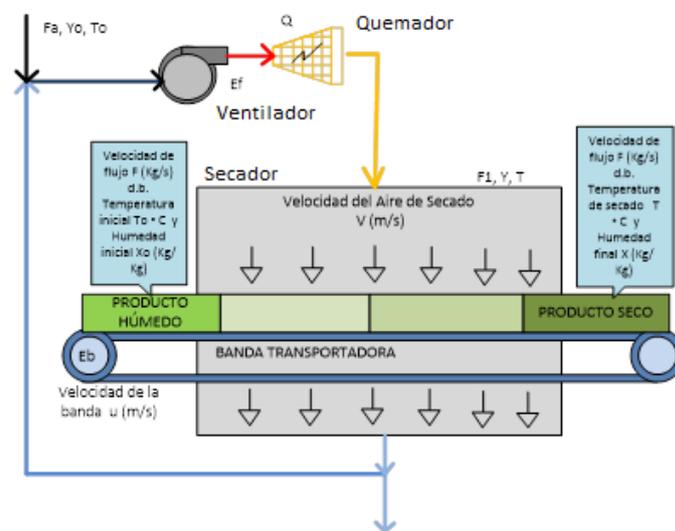
El modelamiento de secadores continuos para la deshidratación de alfalfa tiene gran influencia que depende de la calidad del secado, para ello se da a conocer el proceso y métodos experimentales para lograr una adaptación del modelo de secado y definir las condiciones a las que se rige el modelamiento del presente trabajo.

### **1.6.1 Descripción del Proceso de Deshidratación en Secadores de Banda Transportadora.**

De acuerdo a la Figura 1.18 se describe el siguiente proceso:

El producto húmedo entra a una velocidad de flujo  $F(kg/s)_{base\ seca}$ , temperatura inicial  $T_o$  (K) y humedad  $X_o$  ( $kg/Kg_{base\ seca}$ ) se distribuye en la banda transportadora a medida que entra en el secador a una velocidad  $u(m/s)$ . El producto seco sale del secador a la misma velocidad de flujo en base seca  $F(kg/s)_{base\ seca}$ , a temperatura  $T_f(K)$  con una humedad final  $X_f(kg/Kg_{base\ seca})$ . La cantidad de energía requerida para el proceso de secado es dotada por

la cantidad de energía  $Q_{\text{térmica}}$  (KW) que gasta el quemador. Las condiciones del aire para el diseño puede considerarse constante debido a su alta recirculación de aire, (Mujumdar, 2006), Handbook of Industrial Drying, p. 148.



**Figura 1.18 Diagrama de flujo de un secador de banda transportadora.**

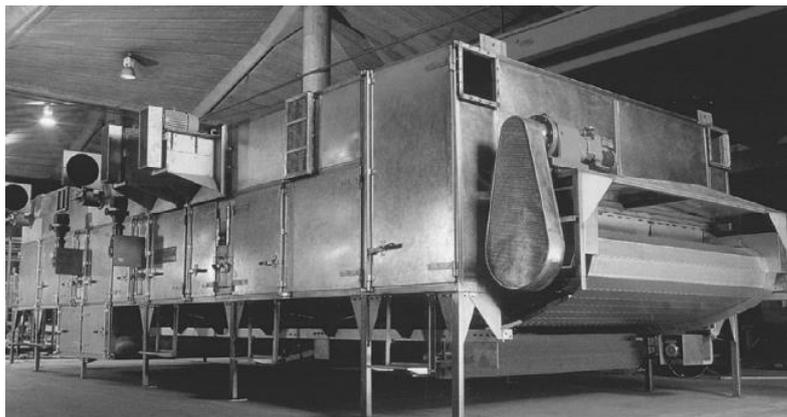
Fuente: MUJUMDAR, 2006, Handbook of Industrial Drying, p. 148.

### 1.6.2 Información Requerida Modelamiento de un Secador Continuo de Banda Transportadora.

Para realizar el modelamiento de secadores continuos de banda transportadora como el que se indica en la Figura 1.19, se requiere de lo siguiente:

Curva de secado del producto, basada en pruebas a pequeña escala con constantes del proceso considerando los mejores parámetros como:

- Temperatura y velocidad con la que fluye el aire de secado, peso del producto durante la estimación de un determinado tiempo de retención del producto.
- Es necesario tener varias curvas de secado que determinan las condiciones de un secado óptimo.
- Cálculos de transferencia de masa y calor.



**Figura 1.19 Secador continuo de paso simple**

Fuente: (Mujumdar, 2006). Handbook of Industrial Drying, p. 437

Los principales parámetros que se considera para el dimensionamiento de secadores son:

- Área de secado
- Calor sensible, el requerido para calentar el producto.
- Calor latente, el necesario para producir la evaporación de agua contenida en el producto.
- La cantidad de energía involucrada en el proceso es la relación dada entre la suma de calor sensible y latente con el tiempo de retención del secado.

### **1.6.3 Parámetros y Condiciones que establecen el modelamiento del secador de banda para la deshidratación de alfalfa**

A continuación se presenta dos modelos experimentales en los cuales se describe el proceso mediante el cual se ha determinado características de secado aceptables tanto para temperaturas bajas como para temperaturas altas con distintos tipos de muestras;

Se realiza esta revisión con la finalidad de establecer condiciones para el modelamiento del secador de banda para la deshidratación de alfalfa.

#### ***1.6.3.1 Modelo Experimental de secado de alfalfa a temperaturas bajas según Patil, Sokhansanj, Arinze & Shoenau (1992)***

Patil, Sokhansanj, Arinze & Shoenau (1992). Detallan en su estudio “*Thin Layer Drying of Components of Fresh Alfalfa*” la importancia de las condiciones de alfalfa al ser deshidratada.

Procedimiento realizado:

Determinación del contenido de humedad al horno a 376.00K durante 24 horas basado en el método ASAE standard S358.1; ASAE 1991.

- Establecimiento de las condiciones físicas de las muestras de alfalfa.
- Adaptación de datos a un modelo aceptable.
- Determinación de la tasa de secado usando sistemas de análisis estadístico.

De acuerdo al proceso de deshidratación de alfalfa se tiene un pequeño resumen con respecto al trabajo realizado por Patil, Sokhansanj, Arinze & Shoenu (1992), en el que se describe el uso de muestras que son principalmente trozos de 50mm de longitud, el análisis experimental está basado en dos cosechas una en estado de prefloración y otra con el 10% de floración.

El análisis se subdivide en secados completos es decir hojas y tallos, solo hojas y otras de tallos.

De acuerdo a la tabla 1.6 se considera el estado de madures de la planta, el contenido de humedad relativa a la que se desarrolla el proceso de deshidratación y el tiempo de secado.

### Tablas 1. 6 Resumen de las muestras de alfalfa con 8% de contenido de humedad

**Table II. Summary of drying tests and the results of drying to 8% moisture content**

Material	Length (mm)	Harvest stage	Growth stage	Temp (°C)	RH (%)	MCI (% wb)	EMC (% wb)	Drying time (min)	k (min <sup>-1</sup> )	Rel. k
Stem	50	second cut	pre bloom	60	5	85.5	5.16	257	0.0211	1.09
Leaves	-	second cut	pre bloom	60	5	83.2	3.65	105	0.0451	2.35
Whole	50	second cut	pre bloom	60	5	85.1	5.29	313	0.0192	1.00
Stem	50	first cut	10% bloom	60	30	78.6	5.50	505	0.0098	0.51
Leaves	-	first cut	10% bloom	60	30	77.9	5.00	376	0.0113	0.59
Whole	50	first cut	10% bloom	60	30	78.2	6.00	811	0.0067	0.35
Stem	10	second cut	pre bloom	60	5	85.8	3.36	110	0.0445	2.32
Stem	20	second cut	pre bloom	60	5	86.2	3.51	154	0.0321	1.67
Stem	30	second cut	pre bloom	60	5	85.8	4.64	215	0.0244	1.27
Stem	50	second cut	pre bloom	60	5	85.5	5.16	257	0.0211	1.10
Stem	75	second cut	pre bloom	60	5	85.7	5.88	352	0.0165	0.86
Stem	50	second cut	10% bloom	70	5	64.7	2.43	70	0.0511	2.66
Stem	50	second cut	10% bloom	80	5	64.4	1.42	66	0.0511	2.66
Stem	50	first cut	10% bloom	60	5	77.9	3.71	146	0.0303	1.58
Stem	50	second cut	10% bloom	60	5	68.0	2.91	143	0.0261	1.36

Fuente: Patil, Sokhansanj, Arinze & Shoenu (1992), Thin Layer Drying of Components of Fresh Alfalfa, pag. 345

**RH:** Humedad Relativa del medio (%).

**MCI:** Contenido de Humedad inicial de la alfalfa (% base seca).

**ECM:** Contenido de humedad en equilibrio de la alfalfa (% base seca).

La ecuación a la que se ha adaptado los datos experimentales es la siguiente:

$$\frac{M-M_e}{M_o-M_e} = e^{-kt} \quad (1.2)$$

, donde:

$M_o$  = Contenido inicial de humedad (% base húmeda).

$M$  = Contenido instantáneo de humedad a tiempo  $t$  (% base húmeda).

$M_e$  = Contenido de humedad en equilibrio (% base húmeda).

$k$  = constante de secado ( $min^{-1}$ ).

$t$  = tiempo transcurrido (min).

La determinación de la constante  $k$  es para considerar la pérdida de humedad durante el secado, para ello han usado el ajuste de datos no lineal de mínimos cuadrados.

Para el presente trabajo se toma en cuenta que el estado de madures de la alfalfa es un factor importante ya que determina el contenido inicial de humedad y tiempo de secado siendo los parámetros fundamentales para el desarrollo del modelamiento del proceso de deshidratación de alfalfa otro factor importante es el corte de la planta de alfalfa en trozos de 50mm es esencial ya que mejora la calidad de secado.

Primera consideración como condiciones de secado.

**Temperatura de secado:** 353.00K

**Humedad Relativa:** 5%

**Tiempo de secado:** 66 minutos

**Tipo de muestra:** Alfalfa al 10% de floración picada en trozos no mayores a 50mm.

De acuerdo al análisis experimental se concluye que el secado de alfalfa se lo debe desarrollar a temperaturas mayores que 353.00K, considerando el estado de madurez de la alfalfa al momento de la cosecha con un 10% de floración, además es de gran ayuda el corte de la planta en trozos de 50mm ya sirve de ayuda para que el secado sea de mejor calidad tomando en cuenta el tiempo y humedad final de secado.

***1.6.3.2 Modelo Experimental de secado de alfalfa a temperaturas altas según Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005)***

Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005). El desarrollo del modelo experimental se basa en el efecto que tiene la temperatura entre los valores de (373.00K – 473.00K) y la velocidad de secado (0.15 m/s – 0.45m/s) en el secado de cuatro muestras como: tallos aplastados con hojas, tallos sin aplastar, tallos aplastados y una muestra de solamente hojas, tal como se indica en la Tabla 1.6.

**Tabla 1.6 Características de las muestras utilizadas del estudio**

Muestras de los diferentes componentes involucrados en el estudio	
Muestras	Descripción
M1	Tallos aplastados con hojas
M2	Solo tallos
M3	Tallos aplastados
M4	Hojas

Fuente: Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005).

Para el desarrollo de este estudio experimental ha sido considerado lo siguiente:

- Cosecha y almacenamiento térmico a 269.00K en un congelador entre 2 y 3 días antes de los ensayos.
- El secado se lo realiza mediante el método ASAE standard S358.1; ASAE 1991.

Los valores de la temperatura con incrementos de 20 grados y velocidades del aire de secado 0.15, 0.3 y 0.45m/s se muestran en la Tabla 1.7, ensayos se secado realizados hasta conseguir un 12% de contenido de humedad en la alfalfa.

**Tabla 1.7 Combinaciones Temperatura y Velocidad del aire de secado**

Temperatura de Secado (K)	Velocidad del aire (m/s)		
	0,15	0,3	0,45
373	X	x	X
393	X	x	X
413	X	x	X
433	X	x	X
453	X	x	X
473	X	x	X

Fuente: Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005).

El contenido de humedad en equilibrio es nulo, dado que las humedades han sido obtenidas a temperaturas inferiores y se considera la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{M}{M_0} = e^{-kt} \quad (1.3)$$

El coeficiente de correlación  $R^2$  juega un papel importante ya que dependiendo de su valor, determina la validez de la información a obtener en un modelo predictivo.

$$k = k_0 \cdot e^{\left(\frac{-Ea}{RT}\right)} \quad (1.4)$$

Dónde:

$k_o$ : Es una constante.

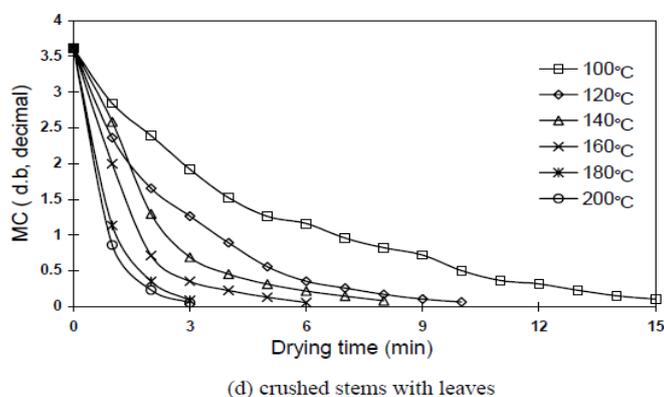
$E_a$ : Energía de Activación (J/ mol).

R: Constante universal de los gases con el valor de  $8.314 \times 10^{-3}$  KJ / mol. K.

T: Temperatura (K).

$k_o$  y  $E_a$ . Han sido determinadas con el uso del análisis regresivo por lo que son dos factores importantes que determinan la calidad del secado.

En la Figura 1.24 se muestra las curvas de secado a diferentes temperaturas de secado con muestras de hojas y tallos aplastados de alfalfa; Siendo esta muestra la que se considera como la más útil y tomar en cuenta para el desarrollo de este trabajo.



**Figura 1.20 Disminución de la velocidad de secado de una muestra completa de alfalfa aplastada a varias temperaturas y 0.3m/s de velocidad del aire de secado.**

FUENTE: Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005). Drying and Quality characteristics of Different Components of Alfalfa. *ASAE Annual Meeting*, 056185, 1-12.

Otra consideración que se toma en cuenta de este estudio es el contenido de proteína cruda de las hojas y la fibra cruda de los tallos de alfalfa siendo valores nutritivos de la alfalfa después del secado que determinan la calidad en el metabolismo de animales rumiantes, a continuación

se muestra en la Tabla 1.8 el contenido de proteína y fibra cruda de alfalfa deshidratada en función de la variación de: temperatura, velocidad y tiempo de secado.

**Tabla 1.8 Parámetros de secado y composición de los forrajes de alfalfa.**

Drying temperature (°C)	Air velocity (m/s)	Drying duration (min)	Crude protein in leaves (%)	Crude fiber in stems (%)
100	0.15	15.6	17.26±0.07	22.46±0.09
120	0.15	11.5	18.61±0.09	22.57±0.11
140	0.15	8.7	18.34±0.22	22.46±0.05
160	0.15	6.7	17.77±0.52	22.15±0.26
180	0.15	5.3	16.23±0.34	22.56±0.17
200	0.15	4.4	15.17±0.56	21.93±0.34
100	0.30	11.3	17.51±0.34	22.35±0.12
120	0.30	8.4	17.93±0.19	22.71±0.18
140	0.30	6.3	18.23±0.26	22.56±0.12
160	0.30	4.9	18.11±0.26	22.38±0.04
180	0.30	3.9	16.52±0.31	23.12±0.51
200	0.30	3.2	15.22±0.60	22.25±0.26
100	0.45	9.5	18.16±0.35	22.31±0.24
120	0.45	7.1	18.11±0.15	22.55±0.22
140	0.45	5.3	17.62±0.22	22.19±0.34
160	0.45	4.1	17.21±0.14	22.65±0.11
180	0.45	3.3	16.32±0.27	22.09±0.20
200	0.45	2.7	15.25±0.28	22.16±0.47

Fuente: Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005). *Drying and Quality characteristics of Different Components of Alfalfa. ASAE Annual Meeting*, 056185, (pp. 1-12)

Los datos de secado que se indica en la Tabla 1.9, han sido equipados con el modelo exponencial a través de regresiones, los valores de  $R^2$  están entre 0,9045 a 0,9997, lo que indica que el modelo exponencial es apropiado para describir los comportamientos de secado.

**Tabla 1.9 Constantes de secado ( $\text{min}^{-1}$ ) y  $R^2$  valores de diferentes componentes en diferentes temperaturas de secado.**

Table 1 Drying constants ( $\text{min}^{-1}$ ) and  $R^2$  values of different components under different drying temperatures

Drying temperature(°C)	Crushed stems with leaves		Un-crushed stems		Crushed stems		Leaves	
	$k$	$R^2$	$k$	$R^2$	$k$	$R^2$	$k$	$R^2$
	( $\text{min}^{-1}$ )		( $\text{min}^{-1}$ )		( $\text{min}^{-1}$ )		( $\text{min}^{-1}$ )	
100	0.1274	0.9052	0.1023	0.9369	0.14	0.8875	0.1554	0.9241
120	0.2510	0.9517	0.2421	0.9586	0.2717	0.9336	0.2051	0.9743
140	0.2886	0.9814	0.2777	0.9701	0.3523	0.9818	0.3234	0.9907
160	0.4420	0.9767	0.3784	0.9876	0.4569	0.9836	0.6441	0.9962
180	0.7531	0.9475	0.5378	0.9934	0.6473	0.9459	1.3538	0.9489
200	0.9056	0.9657	0.7541	0.9882	0.759	0.9566	2.5	0.9997

Fuente: Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005). *Drying and Quality Characteristics of Different Components of Alfalfa. ASAE Annual Meeting*, 056185, (pp.1-12).

A continuación en la Tabla 1.10, se muestra las condiciones en las que se puede desarrollar un secado moderado a temperaturas altas como segunda opción para el secado de alfalfa.

**Tabla 1.10 Condiciones de secado de acuerdo al estudio Drying and Quality characteristics of Different Components of Alfalfa.**

<b>Condiciones de secado de alfalfa a 393K</b>	
<b>Temperatura de secado:</b>	393K
<b>Humedad Relativa:</b>	5%
<b>Tiempo de secado:</b>	8,4 minutos
<b>Velocidad del aire de secado:</b>	0.30 m/s
<b>Tipo de muestra:</b>	Alfalfa al 10% de floración picada y aplastada en trozos no mayores a 50mm.
<b>Humedad inicial de la alfalfa</b>	78,32%
<b>Energía de Activación (Ea)</b>	411,0 KJ/mol

De acuerdo al resumen del estudio experimental según Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005) se toma en cuenta que para secar alfalfa a temperaturas altas se tiene que tomar en cuenta el estado de madures al 10% de floración para luego aplastarle a la planta con la finalidad de uniformizar el contenido de humedad entre hojas y tallos.

La alfalfa luego de ser aplastada tiene que ser cortada en trozos de 50mm para lograr el paso uniforme del aire de secado.

El tiempo de secado, humedad relativa juegan el papel importante durante el secado ya que determinan la calidad de la alfalfa a condiciones digestibles aptas para su consumo.

La temperatura de secado a 393.00K es la ideal ya que de acuerdo al diagrama psicométrico para temperaturas altas solo se tiene valores de variables que determinan la calidad para el aire de secado en función de esta temperatura como máximo.

#### **1.6.4 Requerimientos por Parte de la Agroindustria Mastercubox S.A.**

La cosecha de la alfalfa se la debe realizar cuando tiene un 10% de floración en su estado de madurez. Para obtener un secado uniforme de la alfalfa es necesario aplastar y cortar en trozos pequeños de aproximadamente 50mm, proceso que se realiza con la maquinaria adecuada para este proceso.

De acuerdo a las necesidades de producción inicial por parte de Mastercubox s.a. se requiere entre 4 a 6 toneladas por hora de alfalfa, teniendo en cuenta lo siguiente:

Operación de la fábrica, 16 horas diarias. Tiempo disponible para la deshidratación de la alfalfa a condiciones deseadas, 1 hora.

Por otra parte como base para la respectiva implementación del secador se necesita conocer:

- La cantidad de agua que se necesita remover de la alfalfa durante el proceso de deshidratado hasta conseguir un 8% de contenido de humedad final.
- Cantidad de aire para remover la humedad interna del secador.
- Cantidad de energía para la deshidratación de la alfalfa.

### **1.7 CONSIDERACIONES PARA EL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR ALFALFA**

De acuerdo al proceso indicado de funcionamiento se tiene las siguientes consideraciones que son la base para la determinación de parámetros que serán utilizados como variables y constantes en la simulación del modelo a desarrollar.

- *La pérdida de humedad durante el secado*

Al momento de determinar el balance de masa, la humedad se compara con la pérdida de agua en el secado, esto en la vida real no del todo sucede así ya que cierta cantidad de sólidos se pierde con el gas de secado.

- *La pérdida de calor a los contornos del secador es insignificante.*

Como se explica en la anterior suposición ahora realizando un balance de energía para el calentamiento, se sostiene que es un proceso adiabático, con la excepción del ingreso y salida del secador ya que tienen contacto con el aire exterior. La pérdida de calor al contorno del secador es despreciable ya que en comparación con la energía necesaria para eliminar la cantidad de agua requerida es mucho mayor.

- La presión atmosférica es constante.
- La densidad, capacidad de calor específico, área de evaporación/ volumen y el calor latente son asumidas como constantes del proceso.
- La velocidad de transporte de la banda y el flujo de aire de secado son constantes.
- Los métodos que causan el cambio de la tasa de secado son ejecutados por el ajuste de temperatura, humedad, flujo del aire de secado y velocidad/tiempo de retención del producto en la banda igual constante.
- La temperatura y humedad se dispone como variables de entrada del proceso.

## **1.8 VALORES ESTIMADOS PARA EL MODELO DE DESHIDRATACIÓN ALFALFA**

Ya conociendo las variables y parámetros que se necesita tomar en cuenta en la deshidratación de alfalfa, se define las condiciones tanto para el aire como para la alfalfa, con la finalidad de obtener el comportamiento completo del proceso y tener los valores de las variables que se requiera para el modelamiento del secador de banda.

### 1.8.1 Condiciones del Aire de Secado para la Deshidratación de Alfalfa

El aire de secado es tratado a partir de las siguientes condiciones basadas en un análisis psicrométrico:

La temperatura inicial es de 298.00K con una humedad relativa de 50,00%.

La temperatura para el secado es de 393.00K con una humedad relativa de 0,5%.

Con esta información usando el diagrama psicrométrico se presenta la Tabla 1.10, las propiedades del aire de secado a las condiciones que se tiene:

**Tabla 1.11 Condiciones base del aire para el secado**

<b>Variables/Condiciones</b>	<b>INGRESO</b>	<b>SECADO</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura	298.00	393.00	K
Entalpia	51	310	KJ/kg de aire seso
Humedad del aire	0,01	0,067	Kg/Kg de aire seco
Volumen Específico	0,86	1,22	m3/kg de aire seco

### 1.8.2 Condiciones para la deshidratación de alfalfa

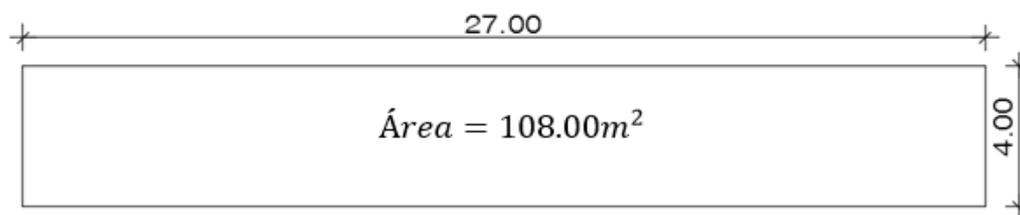
A continuación se muestra los valores totales del proceso como son, cantidad de agua a extraer durante la deshidratación, volumen de secado con la finalidad de saber la cantidad total de alfalfa después del secado.

#### *1.8.2.1 Cantidad de Agua a extraer durante la Deshidratación de Alfalfa*

Para realizar el Balance de masa de agua se ha tomado en cuenta las siguientes condiciones:

- El secador de banda extraerá el agua de la alfalfa a partir de una humedad de 78.32% hasta que el contenido de humedad sea de 8.00%.

- La cantidad de alfalfa se hace en referencia a la superficie de secado, tal como se indica en la Figura 1.20.



**Figura. 1.20 Área de Secado del Secador de Banda Transportadora**

- Conociendo el tiempo de secado de 8.4 minutos, de acuerdo a los parámetros estimados en el segundo modelo experimental.
- Usando el tiempo de retención durante el secado se procede a calcular el flujo másico de alfalfa, de acuerdo a la Figura 1.21 se tiene una representación gráfica del proceso del transporte de alfalfa en un secador continuo de banda transportadora.

$$\tau = \frac{A * s * \rho}{\dot{m}} \quad (1.5)$$

, donde

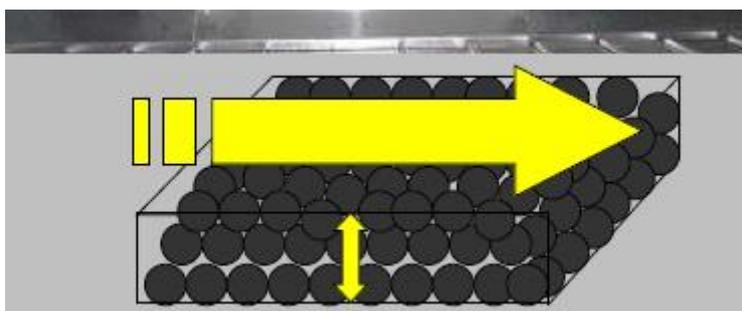
$\tau$ : Tiempo de retención del secado

$A$ : Superficie de secado ( $m^2$ )

$e$ : Espesor de la capa del producto a secar deshidratar.

$\rho$ : Densidad de la Alfalfa ( $Kg/m^3$ )

$\dot{m}$ : Flujo másico de Alfalfa ( $Kg/s$ )



**Figura 1.21 Representación Gráfica del Transporte de Alfalfa Durante el Secado**

Fuente: [http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

Con los siguientes valores se procese a calcular el flujo másico usando la ecuación (1.3).

$$\tau = 8.4 \text{ min.}$$

$$A = 108,00m^2$$

$$e = 0.15m$$

$$\rho = 90.00(Kg/m^3)$$

$$\dot{m} = \frac{108m^2 * 0,15m * 90 Kg/m^3}{504.00s}$$

$$\dot{m} = 2.89 kg/s$$

De aquí se obtiene la cantidad de alfalfa disponible para el secado.

$$\dot{m} = m/\tau \quad (1.6)$$

Donde,

$m$ : Masa de alfalfa en Kg.

$$m = \frac{2.98Kg}{s} * 504.00s$$

$$m = 1458.00Kg$$

Ahora estimando para una hora se divide 3600s para 504.00 siendo 7.14 el factor para estimar la cantidad de agua a evaporar en una hora.

$$m_{hora} = m_a * 7.143$$

$$m_{hora} = 1458.00 * 7.143$$

$$m_{hora} = 10414.29Kg$$

El volumen total de alfalfa que ingresa al secador en 504.00s.

$$V = m/\rho \quad (1.7)$$

Donde,

V: Volumen de alfalfa ( $m^3$ )

$\rho$ : Densidad de la alfalfa ( $Kg/m^3$ )

$$V = \frac{10414.29Kg}{90,00 Kg/m^3}$$

$$V = 16.2m^3$$

Y en una hora es de:

$$V_{hora} = 16.2m^3 * 7.143$$

$$V_{hora} = 115.71m^3$$

Conociendo la cantidad de alfalfa que ingresa durante 504.00s y en una hora se hace un balance del contenido de agua a extraer durante el secado mediante el uso de la Tabla 1.11.

**Tabla 1.12 Balance del contenido de agua a extraer durante el secado**

Cantidad de Agua a Remover por hora Durante el Secado				
	Masa Húmeda	+	Masa Seca	= Masa Total
INGRESO	0.7832		0.2168	1
SALIDA	0.08x		0.2168	x

Obteniendo como resultado  $x = 0.2357$

1 -  $x$  = unidades de agua, siendo la base unitaria de agua a extraer durante el secado que multiplicada por la cantidad de alfalfa que ingresa al secador se obtiene la masa total de agua a ser evaporada.

Y esto se representa en la Tabla 1.12:

**Tabla 1.13 Cantidad de agua a evaporar durante el secado de Alfalfa**

<b>CANTIDAD DE AGUA A EVAPORAR DURANTE UNA HORA</b>	
<b>UNIDADES DE AGUA</b>	<b>Masa total de Agua a extraer (Kg)</b>
0.7643	7960.14

Con respecto a la tabla se obtiene la cantidad de alfalfa seca al final de secado sabiendo que:

La capacidad promedio de alfalfa (m) a secar durante un periodo de secado es de  $10414.29Kg$ .

La cantidad de agua a extraer  $m_{H_2O}$  durante el secado es de  $7960.14Kg$ .

La cantidad de alfalfa seca (ms) es:

$$m_s = m - m_{H_2O} \quad (1.8)$$

Donde,

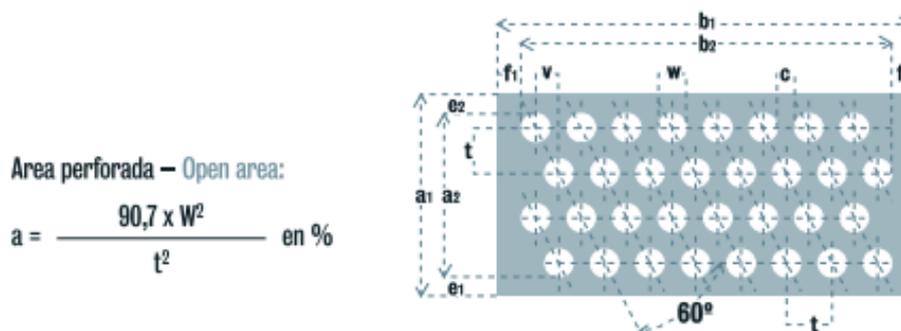
$m_s$ : Masa seca de alfalfa (Kg).

$m_{H_2O}$ : Masa de agua a extraer de la alfalfa (Kg).

$$m_s = 2454.14Kg$$

### **1.8.3 Características para la superficie de secado de alfalfa**

Para desarrollar esta parte se aproxima los valores que tiene la superficie de secado en este caso se recurre a las características que tiene una chapa perforada de la Figura 1.22 que se indica un tipo de perforaciones circulares, la cual servirá de soporte para el transporte de alfalfa a lo largo del secador de banda y variable que determina el nivel de traspaso del aire perpendicular de secado en la alfalfa.



**Figura 1.22 Agujeros redondos tresbolillo 60°**

Fuente: <http://chapa perforada.com/images>

<http://www.chapaperforada.com/images/stories/virtuemart/category/Cat%C3%A1logo%20General.pdf>

Las dimensiones de la chapa perforada se muestran a continuación en la Tabla 1.13.

**Tabla 1.14 Disponibilidad de chapas perforadas de 3mm**

Variables	Descripción	Valores								Unidades
		5		6				6,5		
W	Diámetro agujeros	5		6				6,5		mm
t	Distancia entre centros	9	10	8	9	9	10	11	10	mm
a	Área perforada	28	23	51	45	40	33	26	38	%
e	Espesor	3								mm
L	Largo	2000								mm
A	Ancho	1000								mm

Como una mejor elección se toma en cuenta la chapa perforada que cuenta con una mayor disponibilidad de área libre, para este caso y de acuerdo a lo que rige la “**Food and Agriculture Organization**” (FAO) se recomienda usar chapas perforadas mínimo en disponibilidad en área libre del 40%, para ello se ha tomado en cuenta las características que se muestran en la Tabla 1.14 para la chapa perforada que servirá como superficie de secado para la deshidratación de alfalfa.

**Tabla 1.15 Dimensiones de la chapa perforada destinada para la construcción de la superficie del secador para la deshidratación de alfalfa.**

Variables	Descripción	Valores	Unidades
W	Diámetro agujeros	6	mm
t	Distancia entre centros	8	mm
a	Área perforada	51	%
e	Espesor	3	mm
L	Largo	2000	mm
A	Ancho	1000	mm

#### 1.8.4 Coeficiente de transferencia de calor en la deshidratación de alfalfa.

La velocidad recomendada para el aire de secado de 0.30m/s según se recomienda en el subcapítulo de interés 1.6.3.2 se modifica con 1.00m/s ya que concluye que no existe cambio con las propiedades de la alfalfa deshidratada.

Con esta información se procede a calcular el coeficiente de transferencia de calor según la ecuación (1.1).

$$\frac{h_y D}{k} = 1.17 Re^{0.585} Pr^{\frac{1}{3}}$$

En la Tabla 1.15 se indica las propiedades para el aire a 1atm y 393,00 K.

**Tabla 1.16 Propiedades del aire a 1atm y 393,15 K**

$\rho$	$C_p$	$\nu \cdot 10^{-6}$	$k \cdot 10^{-3}$	$Pr$
(Kg/m <sup>3</sup> )	(KJ/Kg . K)	(m <sup>2</sup> /s)	(W/m . K)	
0,8711	1,014	26,41	33,8	0,69

Fuente: Incropera, F. & De Witt D. (1996). Fundamentos de Transferencia de Calor, Tabla A4, propiedades termo físicas de gases a presión atmosférica, (p. 839).

Se procede a calcular el valor de  $h_y$ :

$$h_y = \left( 1.17 Re^{0.585} Pr^{\frac{1}{3}} \right) k/D$$

$$Re = \frac{V \cdot D_p}{\nu} \quad (1.9)$$

Donde,

$V$ : Velocidad del flujo de aire para el secado (m/s).

$D_p$ : Diámetro de las partículas involucradas en el proceso (m).

$\nu$ : Viscosidad dinámica del fluido ( $m^2/s$ ).

Para este caso se toma en cuenta el diámetro promedio de los tallos de la alfalfa de 0.005m.

$$Re = \frac{1 \text{ m/s} * 0,005\text{m}}{26,41 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 189,32$$

Ahora,

$$h_y = \left( 1.17 * 189,32^{0.585} 0.69^{\frac{1}{3}} \right) k/D$$

$$h_y = (1,17 * 21,49 * 0,8837) k/D$$

$$\frac{k}{D} = 0,15$$

$$h_y = (22,22) * 0,15$$

$$h_y = 3,43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### 1.8.5 Coeficientes de transferencia de calor por convección

De acuerdo a la bibliografía de respaldo y como se indica en la Tabla 1.16 se ha conseguido establecer valores para el coeficiente de calor por convección, coeficiente útil para el proceso

de deshidratación de alfalfa ya que sin él no se lograría establecer un cambio de fase para este proceso que es necesario para la evaporación de agua contenida en la alfalfa.

**Tabla 1.17 Coeficientes de transferencia de calor por convección**

<b>Valores de <math>h</math> (<math>W/m^2 K</math>)</b>	
Convección libre de gases	2 - 25
Convección libre de líquidos	50 - 1000
Convección forzada de gases	25 - 250
Convección forzada de líquidos	50 - 20000
Convección en procesos de ebullición y condensación	2500 - 100000

Fuente: Cengel, Y. & Boles, M. (1998), Termodinámica, sexta ed.

## **CAPÍTULO II**

### **DESCRIPCIÓN Y VINCULACIÓN DE MULTIPHYSICS AUTODESK CON EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA.**

En este presente capítulo se detalla a nivel demostrativo la utilización de Autodesk Simulation Multiphysics 2013 con la finalidad de resumir las diferentes utilidades que tiene el programa para establecer las condiciones y funcionalidades en el modelado del secador para la deshidratación de alfalfa.

#### **2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA DE ELEMENTOS FINITOS (FEA).**

La aplicación del Análisis de elementos Finitos (FEA) está relacionada con algunos campos, como es el análisis estático y dinámico, lineal y no lineal, de esfuerzo y de deflexión, en el campo de la transferencia de calor.

Una pieza mecánica real es una estructura elástica continua, el FEA lo divide o discretiza, dando lugar a sub estructuras llamadas elementos de tipo elástico; Con el empleo de funciones polinomiales un conjunto de operaciones matriciales; el comportamiento de cada elemento se basa en las características del material, sus propiedades.

La aplicación de cargas se da en el interior del elemento como, gravedad, dinámica, térmica etc. Mientras que para las cargas externas, en la superficie o nodos del elemento.

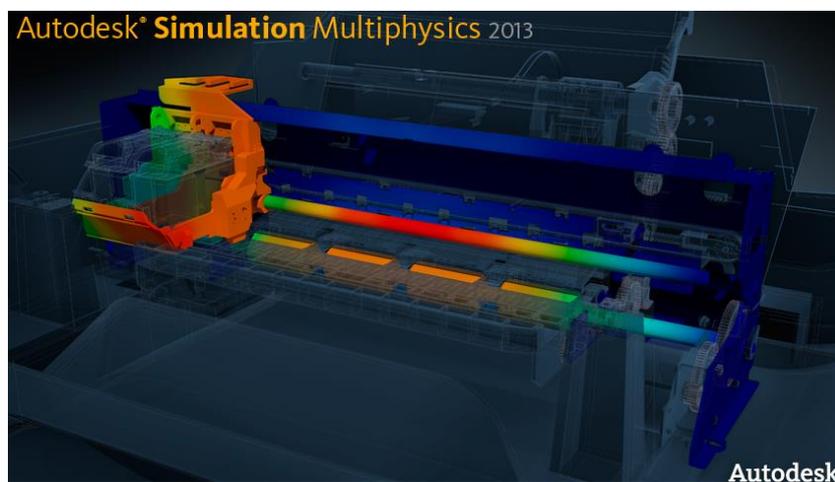
Un nodo es el punto de conexión entre elementos, donde se establece las propiedades elásticas de los mismos, donde se asigna las condiciones de frontera y la aplicación de fuerzas; Un nodo

posee grados de libertad que son movimientos independientes con un máximo de 3 grados para rotación y 3 grados de libertad en translación.

La aplicación de cargas y condiciones frontera con la ayuda de operaciones matriciales se determina todos los valores de todos los grados de libertad de desplazamiento que no se conocen, con los desplazamientos se determina las tensiones y esfuerzos mediante las ecuaciones de elasticidad.

## 2.2 ENTORNO DE DESARROLLO AUTODESK Simulation Multiphysics.

Este software de desarrollo tiene como finalidad principal, aportar con herramientas para validar, simular procesos mecánicos en los que basado a previos cálculos se confirma la respuesta para un análisis en conformidad a lo buscado; Como también su uso se enfoca para realizar modelos que sirve de gran ayuda antes de construir una máquina, el interfaz de inicio de este programa se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1 Ventana de inicio Autodesk Simulation Multiphysics 2013**

Fuente: Autodesk Simulation Multiphysics 2013

### 2.2.1 Fases de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics

- Configuración del modelo
- Análisis del modelo

- Evaluación de resultados

### ***2.2.1.1 Configuración del Modelo***

Para configurar el modelo se sigue los siguientes pasos:

- Definir un sistema de unidades.
- Crear una malla (una cuadrícula de nodos y elementos) que representa el modelo.
- Definir los parámetros de análisis del modelo.
- Definir el tipo de elemento y parámetros.
- Aplicar las cargas y las restricciones.

### ***2.2.1.2 Análisis del modelo***

Es la siguiente etapa de desarrollo de una simulación en la que se ejecuta toda la parte matemática del modelo y consta de dos procesos.

- Montar las matrices de rigidez de los elementos.
- Resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas lineales.

### ***2.2.1.3 Evaluación de Resultados***

Después de haberse ejecutado la simulación se procede a:

- Calcular los resultados.
- Revisar los resultados.
- Generar un informe de los resultados del análisis.

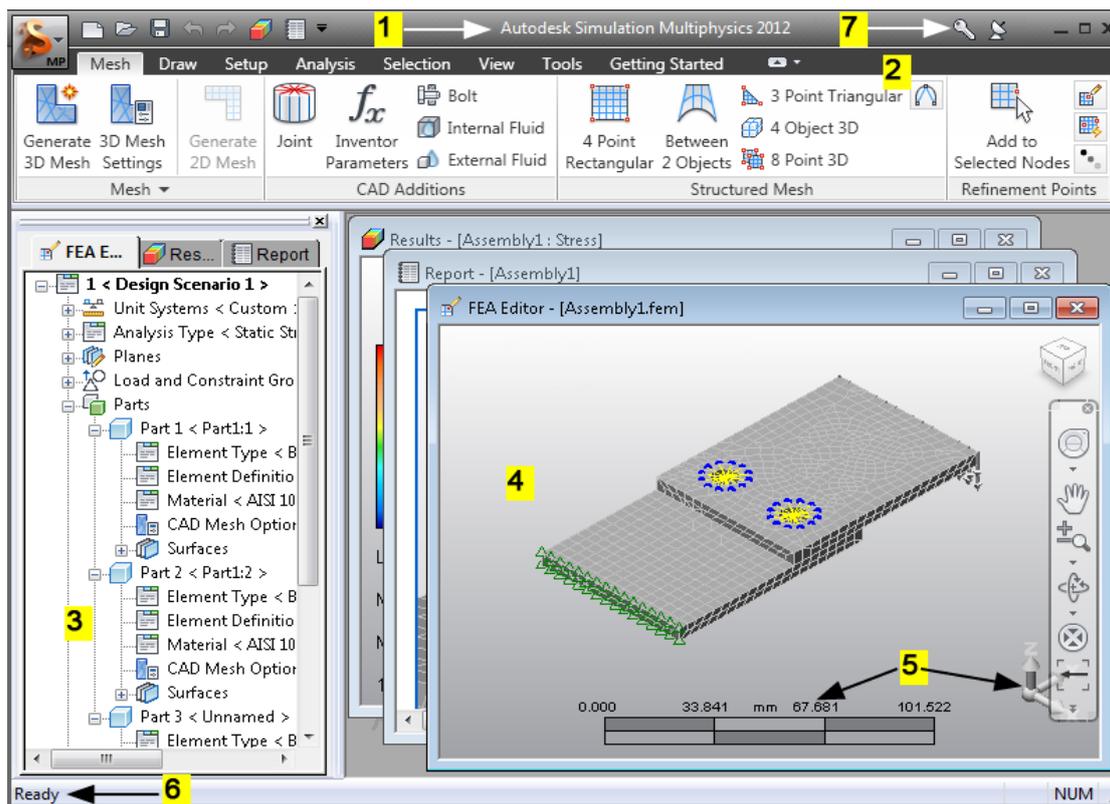
Cada elemento en el análisis se aproxima al comportamiento real. La regularidad de la malla entre más pequeña más precisos serán los resultados. El cambio de la malla puede llevar a resultados diferentes, especialmente cuando los elementos sesgados o distorsionados aparecen en una malla, pero no en otro.

Única recomendación, hay que realizar múltiples análisis utilizando una malla más fina (especialmente en áreas críticas) hasta que los resultados convergen a una solución. Es necesario confirmar los resultados con los cálculos alternativos, y realizar pruebas físicas en el mejor de los casos.

### 2.2.2 Interfaz de Usuario Autodesk Simulation Multiphysics

El interfaz de usuario como se indica en la Figura 2.2, consta de las siguientes partes:

- 1- **Barra de título:** La barra de título estándar de Windows muestra el nombre del programa, también muestra el nombre del modelo, si el área de la pantalla se maximiza.
- 2- **Ventana desplegable:** Situada justo debajo de la barra de título, contiene los comandos.
- 3- **Navegador de vista de árbol:** muestra los parámetros de análisis a utilizar. Cada uno de los ambientes, señalados por las pestañas en la parte superior del navegador, realiza una función diferente.
- 4- **Área de visualización:** Cuando la actividad se lleva a cabo el modelado. La barra de título de la ventana muestra la aplicación en uso y el nombre del modelo. Activación de una de las lengüetas del navegador se activa el área de la pantalla correspondiente y viceversa.
- 5- **Mini eje y escala de la regla:** Muestra el punto de vista con respecto a la zona de trabajo en tres dimensiones y el gobernante escala muestra el tamaño relativo de la modelo.
- 6- **Barra de estado:** Muestra mensajes de estado del modelado.
- 7- **Infocenter:** Utilice el Centro de información para acceder a los servicios de suscripción y actualizaciones relacionadas con el producto.



**Figura 2.2** Interfaz de usuario Autodesk Simulation Multiphysics

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

## 2.3 REVISIÓN DE LOS TIPOS DE ANÁLISIS EN AUTODESK SIMULATION Multiphysics INVOLUCRADOS PARA EL MODELADO DEL SECADOR DE BANDA TRANSPORTADORA

Haciendo referencia al entorno de trabajo de Autodesk Simulation Multiphysics en general se tiene los siguientes tipos principales de análisis:

- Lineal
- No Lineal
- Térmico
- Flujo de Fluidos
- Electrostático
- Transferencia de masa
- Multiphysics

Estas prestaciones que tiene Autodesk Simulation Multiphysics a nivel específico son las siguientes como se muestra en la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1 Detalle de los diferentes tipos de Análisis de desarrollo que tiene Autodesk Simulation Multiphysics 2013**

<b>Tipos de Análisis de Autodesk Simulation Multiphysics 2013</b>	
Linear	- Static Stress with Linear Material Models
	- Natural Frequency (Modal)
	- Natural Frequency (Modal) with Load Stiffening
	- Response Spectrum
	- Random Vibration
	- Frequency Responce
	- Transient Stress (Direct Integration)
	- Transient Stress (Modal Superposition)
	- Critical Buckling Load
	- Dinamical Desing Analysis method (DDAM)
Nonlinear	- MES with Norlinear material Models
	- Statics Stress with Norlinear Material Models
	- Natural Frequency (Modal) with Norlinear material models
	- MES Riks Analysis
Thermal	- Steady_ State Heat Transfer
	- Transient Heat Transfer
Fluid Flow	- Steady_Fluid Flow
	- Unsteady Fluid Flow
	- Flow Through Porous Media
	- Open Channel Flow
Electrostatic	- Electrostatic Current and Voltage
	- Electrostatic Field Strength and Voltage
Mass Transfer	- Transient Mass Transfer
Multiphysics	- Steady Coupled Flow and Thermal
	- Transient Coupled Fluid Flow and Thermal

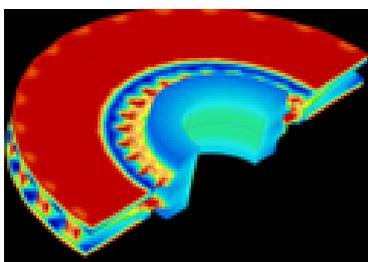
Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

En el transcurso de este capítulo se muestra detalladamente las prestaciones del programa relacionadas transferencia de calor y flujo de fluidos como entornos de desarrollo, para ello se realiza pequeñas aplicaciones que servirán al final del capítulo para determinar todos los

recursos y resultados de los distintos entornos a utilizar para el modelamiento del secador continuo de banda transportadora para la deshidratación de alfalfa.

## 2.4 THERMAL ANÁLISIS

Un análisis térmico se utiliza para determinar la distribución de calor como se ilustra en la Figura 2.3, a través de un modelo en dos o tres dimensiones; las cargas aplicadas a un modelo incluyen la generación de calor ya sea por convección, radiación o conducción.

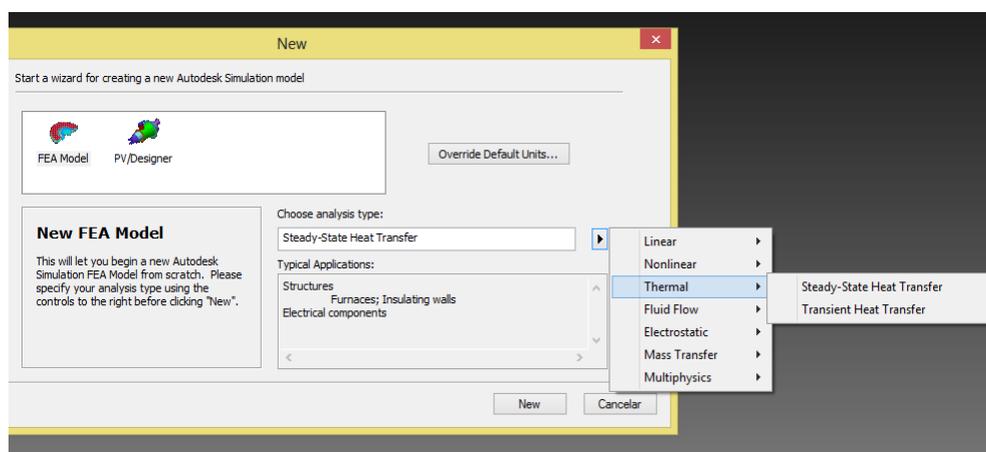


**Figura. 2.3 Análisis Térmico en Autodesk Simulation Multiphysics**

Fuente: Entorno de desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013

Como se había previsto para el análisis de transferencia de calor, se tiene dos condiciones a nivel general que son: estado estacionario y transitorio.

Así en la Figura 2.4 se muestra la selección del entorno de análisis térmico que presenta Autodesk Simulation Multiphysics 2013.



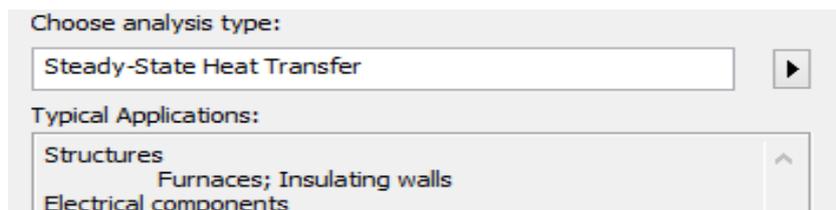
**Figura 2.4 Selección del Entorno de Análisis Térmico**

Fuente: Entorno de desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013

### 2.4.1 Análisis Térmico en Estado Estacionario

Para poder aplicar el análisis de Transferencia de calor en estado estacionario es necesario saber si el sistema es de estado estacionario lineal o no lineal, en otras palabras si la conductividad térmica de un material es función de la temperatura o existe radiación térmica.

Al tener la certeza de que el análisis es del tipo no lineal es necesario aplicar iteraciones a los resultados para encontrar los nuevos valores de las temperaturas y llegar a tener una respuesta plena. En la Figura 2.5 se muestra la ventana de selección para el análisis de transferencia de calor en estado estable.



**Figura 2.5 Selección análisis térmico Steady – State Heat Transfer**

Fuente: Entorno de desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Las cargas que se pueden aplicar en un análisis estacionario de transferencia de calor ya sea lineal o no lineal a continuación se detalla en la Tabla 2.2.

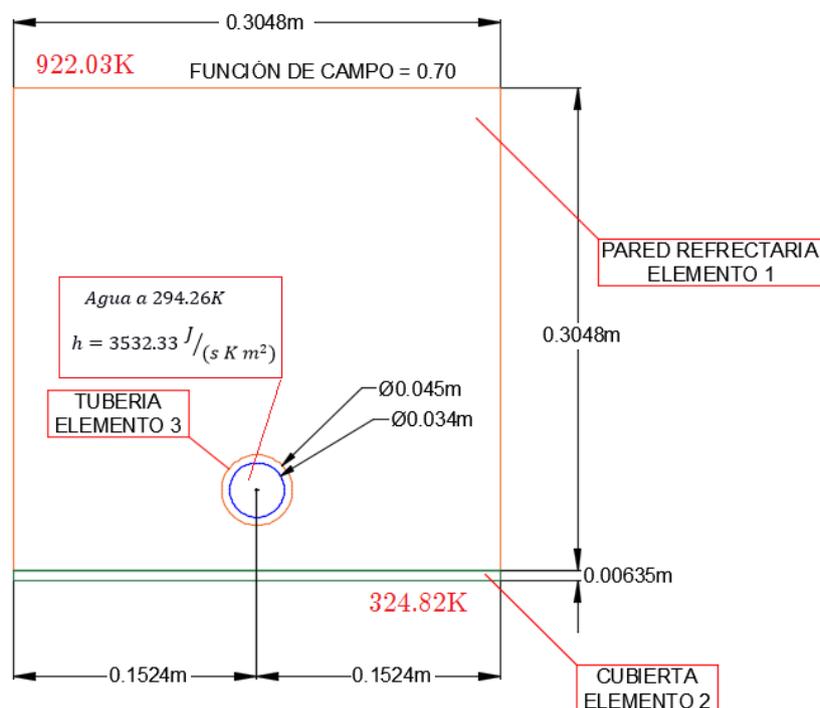
**Tabla 2.2 Aplicación de Cargas en Estado estacionario de Transferencia de calor**

ESTADO ESTACIONARIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR	
TIPO	CARGAS
LINEAL	- Conducción
	- Convección
	- Generación interna de calor
	- Aplicación del coeficiente de transferencia de calor
	- Flujo de calor por unidad de área
NO LINEAL	- Conducción como función de la temperatura
	- Radiación
	- Radiación Cuerpo a Cuerpo
	- Cargas térmicas como función de la temperatura.

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

### 2.4.1.1 Ejemplo Demostrativo para el Análisis Térmico de Régimen Estacionario

En el siguiente ejemplo, se hace referencia al enfriamiento de los muros de un horno refractario por medio de agua refrigerada, para lo cual se necesita conocer la cantidad de calor ganado por pie cuadrado de la tubería, así las condiciones a las cuales se desarrolla este proceso, se indica en la Figura 2.6.



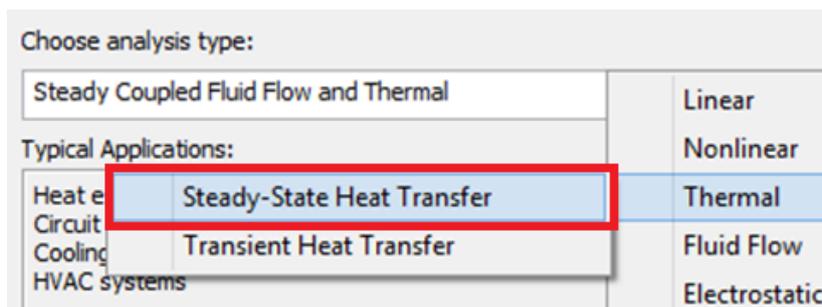
**Figura 2.6 Condiciones del Ejercicio Demostrativo para un Análisis Térmico bajo Régimen Estacionario**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Con esta información se sabe que es un caso de transferencia de calor en régimen estacionario no lineal, debido a que se está utilizando radiación como medio de transferencia de calor.

A continuación se muestra el procedimiento a seguir en *Autodesk Simulation Multiphysics 2013* para llegar a la solución de este ejemplo.

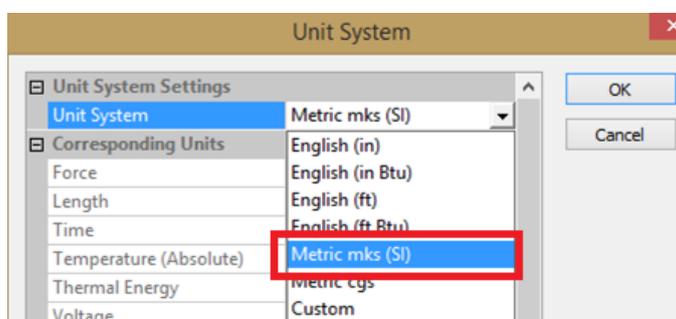
1.- Se inicializa un nuevo análisis de elementos finitos, “*FEA Model*”, como se indica en la Figura 2.7.



**Figura 2.7 Selección Análisis térmico de Régimen Estacionario para el modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

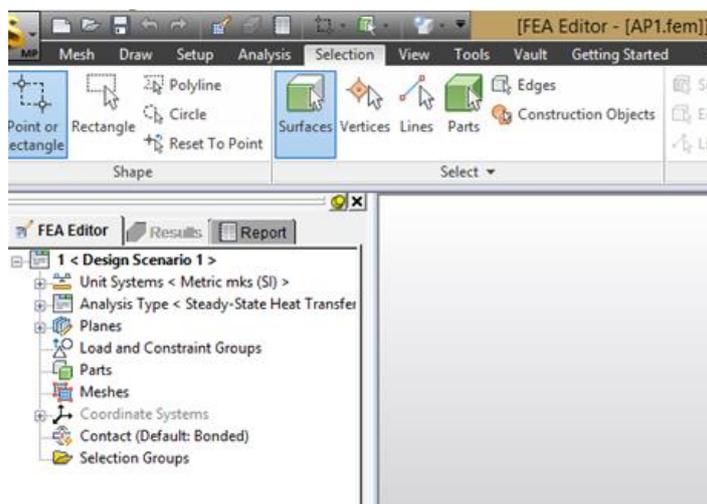
2.- Se elige un sistema de unidades, en este caso **Metric mks (SI)**, tal como se muestra en la ventana de la Figura 2.8.



**Figura 2.8 Selección del Sistema de Unidades para el entorno de trabajo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

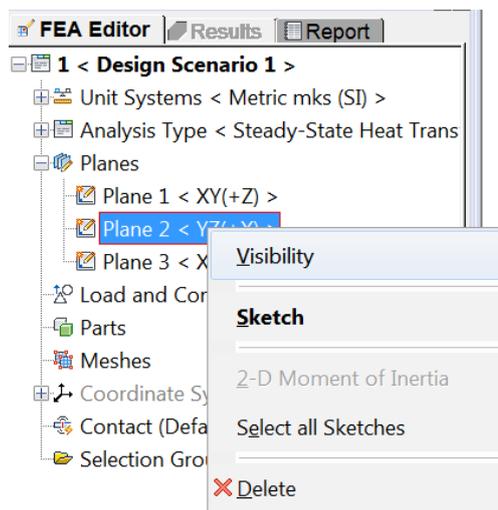
3.- Se guarda el modelo con un nuevo nombre, para proceder con el análisis, luego se mostrara una ventana como indica en la Figura 2.9.



**Figura 2.9 Asignación de un nombre al nuevo analisis FEA.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

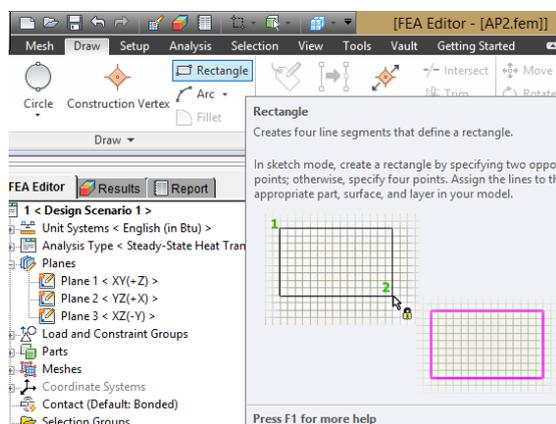
4.- Ahora se procede a dibujar las superficies o elementos involucrados en el **Plano 2 YZ (+X)**, que se encuentra en el editor FEA, escenario 1 de análisis y seleccionando la opción “**Visibility**” tal como se indica en la Figura 2.10, además una vez seleccionado el plano de trabajo hay que hacer doble clic en el mismo para poder trabajar en este.



**Figura 2.10 Selección del plano de trabajo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

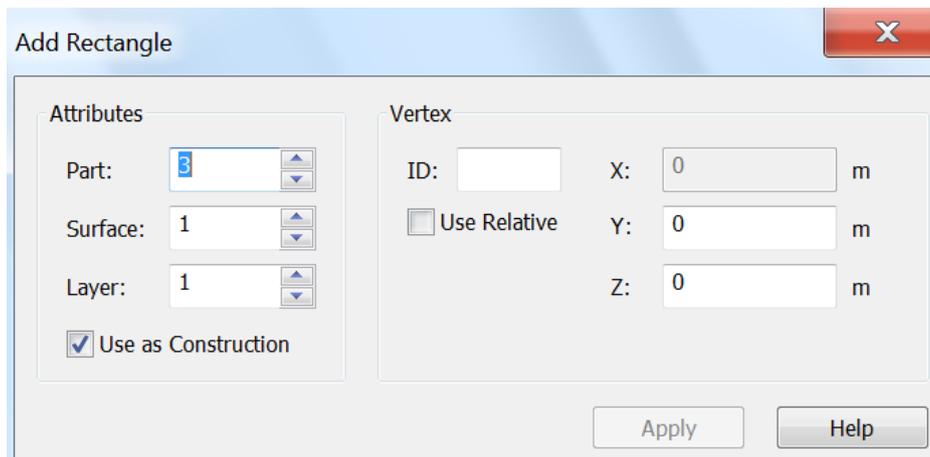
5.- De acuerdo al esquema gráfico de este ejemplo, está conformado por tres elementos, primero se dibujará las partes rectangulares, luego se mostrara el procedimiento para dibujar las partes circulares, entonces en el programa se realiza las siguientes actividades seleccionando la pestaña “**Draw**” y luego “**Rectangle**”, cuando se elija la pestaña se muestra una ventana similar a la Figura 2.11.



**Figura 2.11 Selección de la geometría para la creación de partes del modelo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

6.- Se introduce las siguientes coordenadas para el elemento uno, tal como se muestra en la ventana de la Figura 2.12, primer esquina (0, 0,0), esquina opuesta del rectángulo (0, 0.3048, 0.00635); sin olvidar que es de tipo constructiva, para dibujar los elementos insertando las coordenadas, es necesario hacer “Intro” luego de asignar las coordenadas de los vértices.



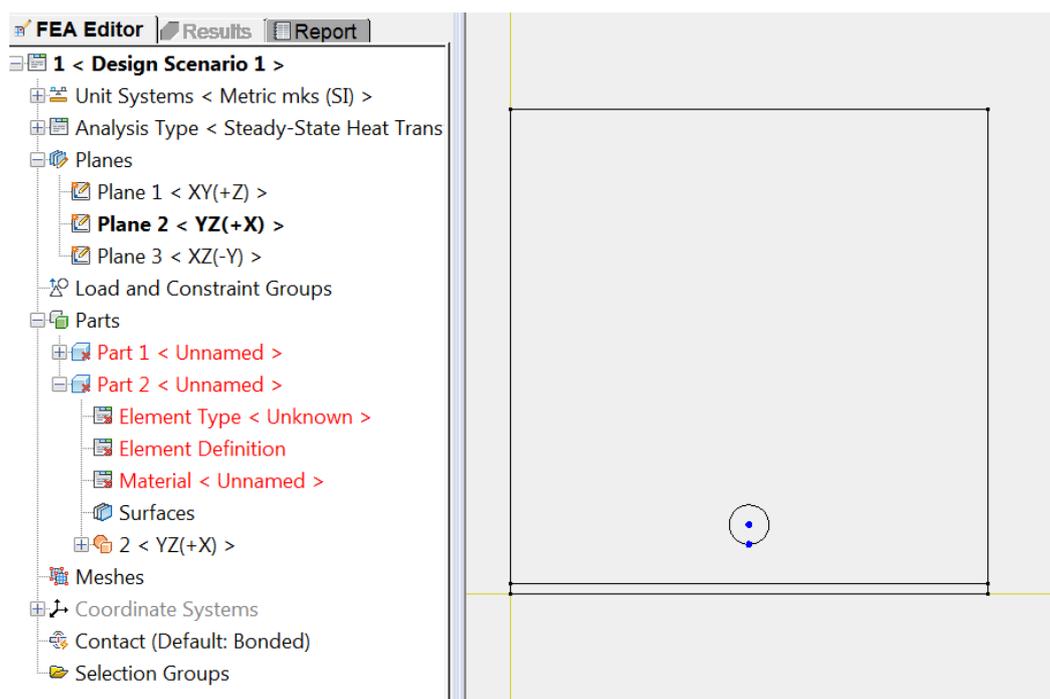
**Figura 2.12 Asignación de coordenadas para la parte uno del modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

7.- Ahora se introduce las coordenadas del segundo elemento que está conformado por un rectángulo que representa la pared refractaria del horno y sección transversal de la tubería que transporta agua refrigerada, para ello se genera un nuevo elemento rectangular con un nuevo número de parte, el proceso es el siguiente:

Se ingresa las coordenadas, primer esquina (0, 0, 0.00635); para la esquina opuesta del rectángulo (0, 0.3048, 0.31115), para la circunferencia se selecciona en “Draw” la opción centro y radio siendo sus coordenadas las siguientes centro (0, 0.1525, 0.04445) y radio (0, 0.01524, 0.03175) respectivamente, luego se tiene las tres partes del modelo.

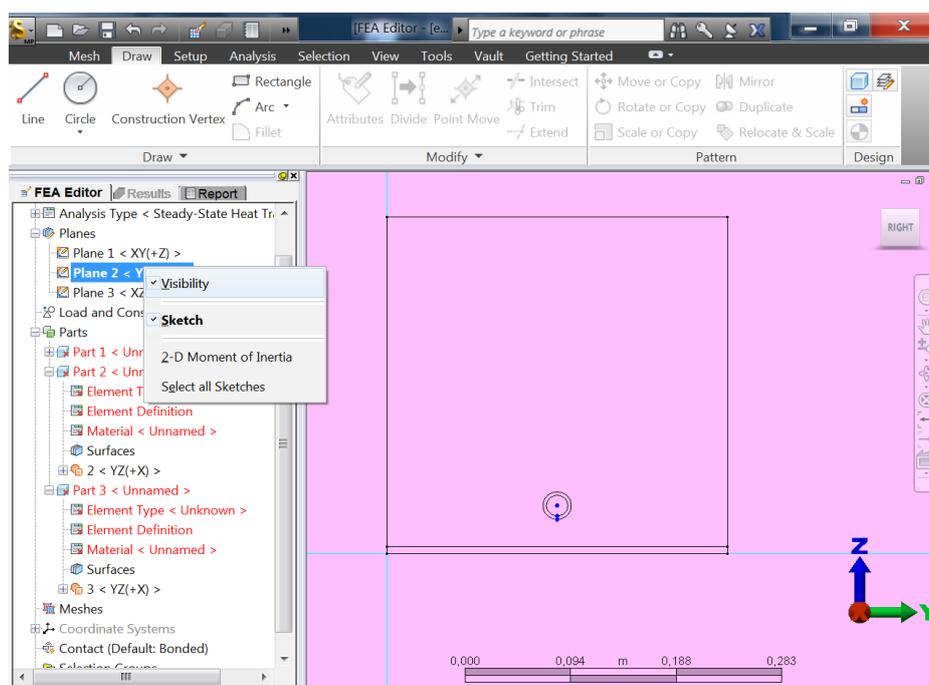
En la Figura 2.13 se muestra la interfaz gráfica con los elementos dibujados, solo falta ingresar las coordenadas para el tercer elemento que es la frontera de sección circular que representa la tubería internamente por donde circula el agua refrigerada.



**Figura 2.13 Asignación de coordenadas de la parte dos del modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

8.- Seleccionando la pestaña “Draw” y la opción centro y radio se genera una nueva superficie, el tercer elemento para lo cual haciendo centro en  $(0, 0.1524, 0.034925)$  y radio  $(0, 0.1524, 0.04445)$  y número de parte igual a “3”, el modelo se muestra en la Figura 2.14.

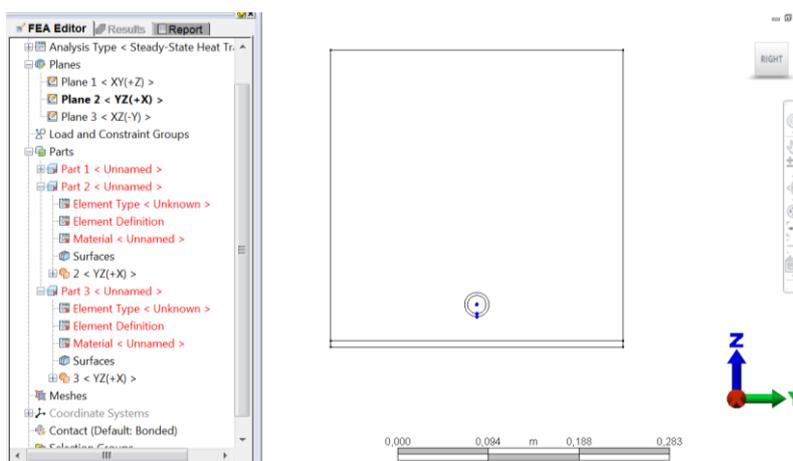


**Figura 2.14 Asignación de coordenadas parte tres del modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Es necesario quitar la visibilidad del plano dos y para ello se hace clic derecho sobre el plano y se hace clic en “*Visibility*”.

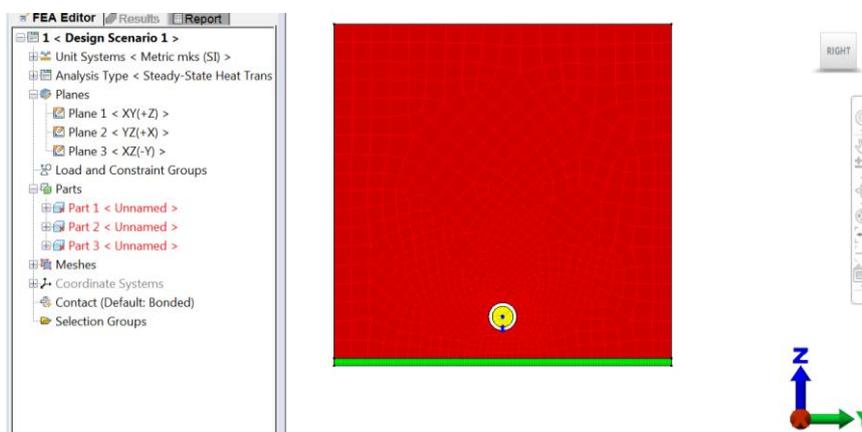
9.-Ahora el modelo queda listo para adoptar los parámetros que se requiere para el análisis, como siguiente paso es el mallado, en la Figura 2.15 se muestra el entorno de trabajo total necesario para este ejemplo.



**Figura 2.15 Visualización de todas las partes del modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Seleccionando las tres superficies cada una de las partes y con la tecla “*Ctrl*” se realiza un mallado 2D, mostrando un modelo como el de la Figura 2.16, antes de ingresar las cargas del modelo se elige el tipo de elemento y el tipo de material, en los siguientes pasos se detalla este proceso.

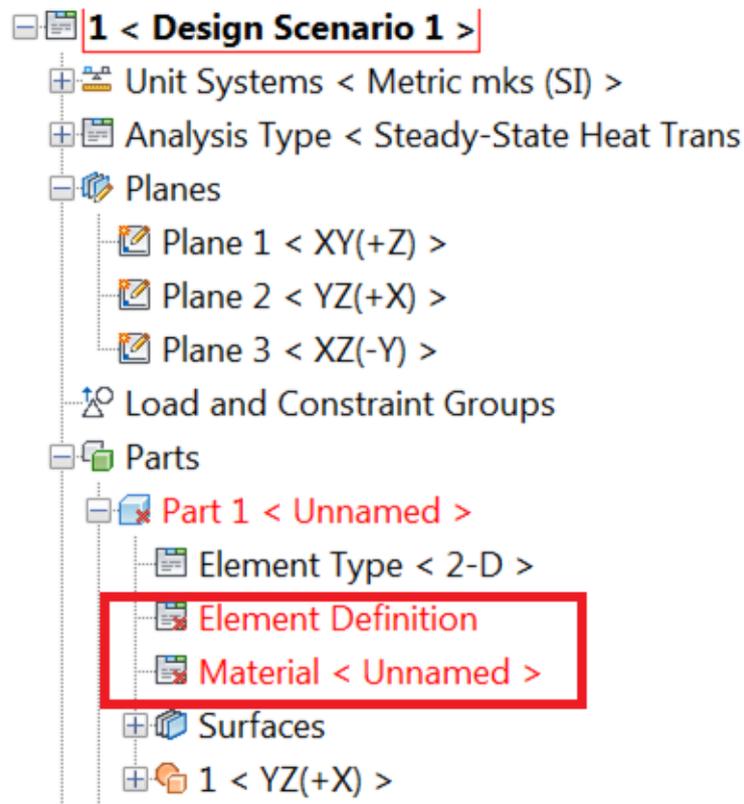


**Figura 2.16 Mallado de las partes del modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

10.- Como se aprecia en la Figura 2.17 se observa texto de color rojo, esto indica que aún falta ingresar los valores de:

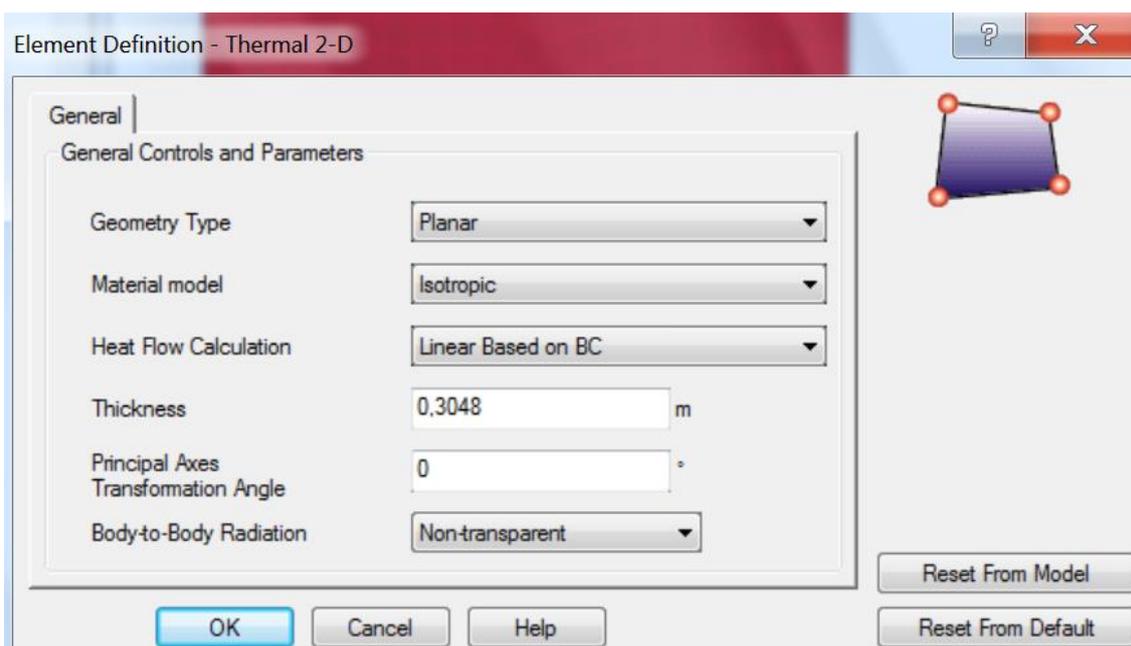
- Conductividad térmica de cada una de las superficies.
- Tipo de elemento que adopta cada una de las superficies.



**Figura 2.17 Estructura de propiedades para las partes del modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

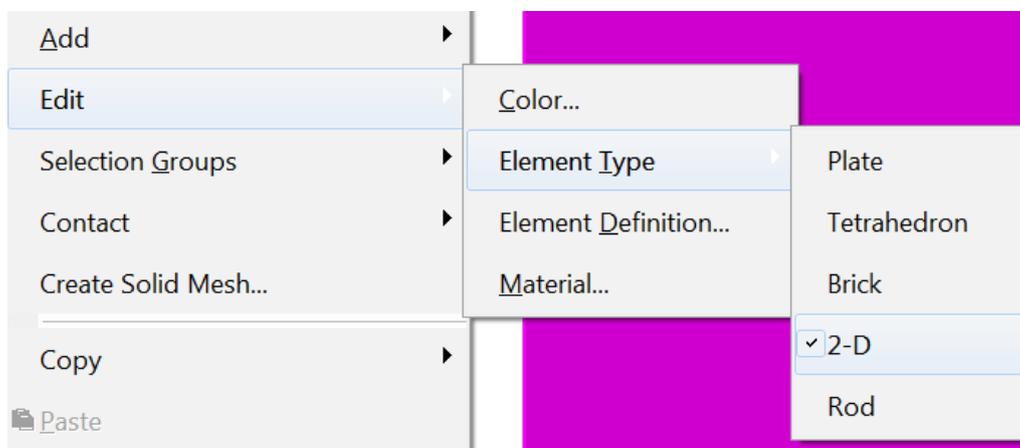
Para ingresar el tipo de elemento del material se selecciona “*Element definition*” haciendo clic derecho y de nuevo clic derecho se elige la opción “*Element definition*”, luego aparece la siguiente ventana como se muestra en la Figura 2.18.



**Figura 2.18 Selección del tipo de Definición de la Parte 1**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

De la misma forma que el paso anterior se elige “*Element definition*” con un clic derecho se selecciona la opción “*Element Type*” y “*2D*”; este proceso se visualiza la Figura 2.19.

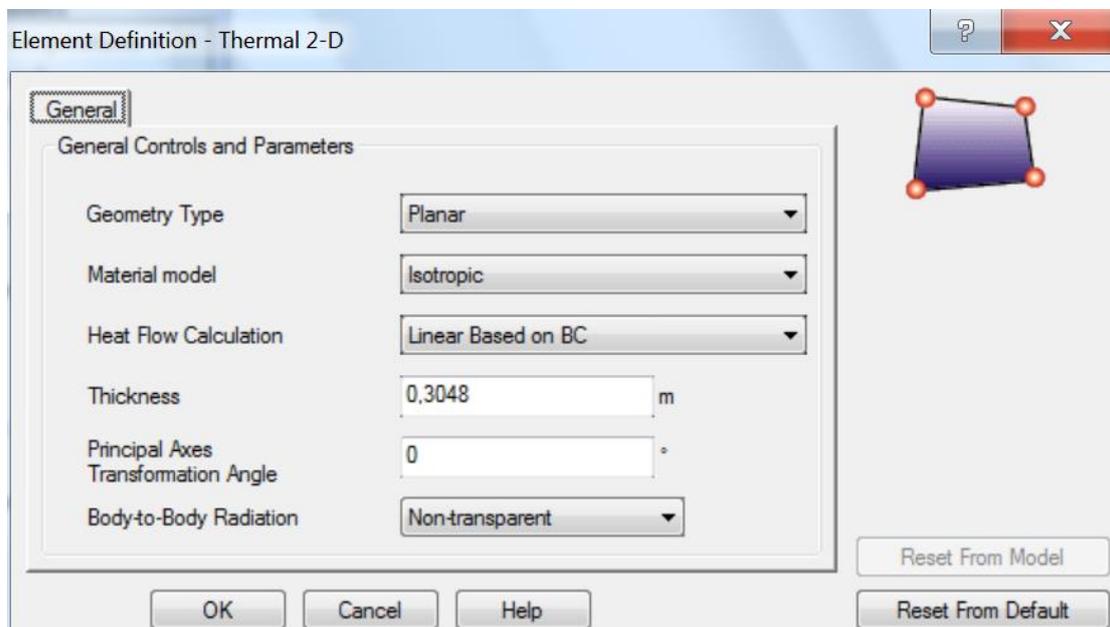


**Figura 2.19 Selección del tipo de Elemento de la Parte 1**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Luego en definición del elemento se asigna propiedades del material de las partes que conforman el modelo para ello, en el árbol de partes se selecciona y con un clic derecho en “*Material < Unnamed >*”, se ingresa 0.3048m como longitud de la tubería en “*Thickness*”, solo en la superficie “3”, como se indica en la Figura 2.20;

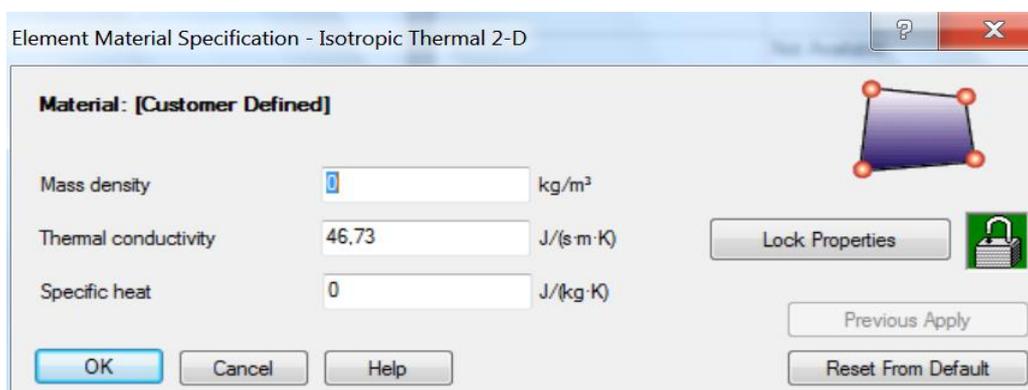
Se selecciona “**Linear Based on BC**” en “**Heat Flow**” para asumir el flujo de calor en la cara interior de la tubería provocado por el refractario al hacer contacto con la tubería.



**Figura 2.20 Ingreso de propiedades Parte 3**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Ahora se ingresa el valor de la conductividad térmica del material de las partes, para el elemento “1” y “3” se asigna el valor de **46.73**, tal como se muestra en la Figura 2.21; Mientras que para el elemento “2” se asigna en valor de **0.82**, esto se realiza haciendo “ **clic derecho**” en “**Material**” y haciendo “ **clic**” en editar propiedades donde se asigna los valores de la *conductividad, calor específico* y *densidad* cosa que para este análisis no es necesario introducir los dos últimos valores.

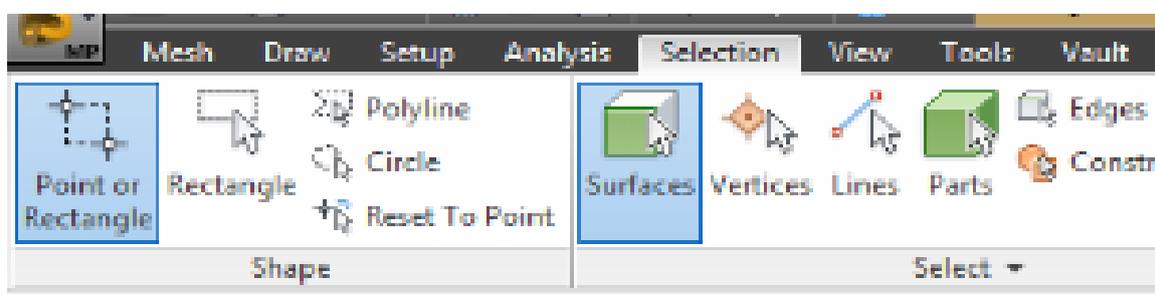


**Figura 2.21 Especificación de Propiedades del material para las partes 1 y 3**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

*11.- Para ingresar los valores de las cargas térmicas en este caso, los valores de la radiación producida por la temperatura interna del horno y convección provocada por el flujo de agua con su respectivo valor de rigidez además hay que tomar en cuenta el valor de la temperatura exterior del horno.*

*El procedimiento para seleccionar las caras de la pared del horno es de la siguiente forma primero se hace “clic” en la pestaña “**Selection**” del programa, luego se hace “clic” en “**Shape**” y se selecciona “**Point of “Rectangle”**” y en “**select**” se hace “clic” en “**Surface**”, como se muestra en la Figura 2.22.*

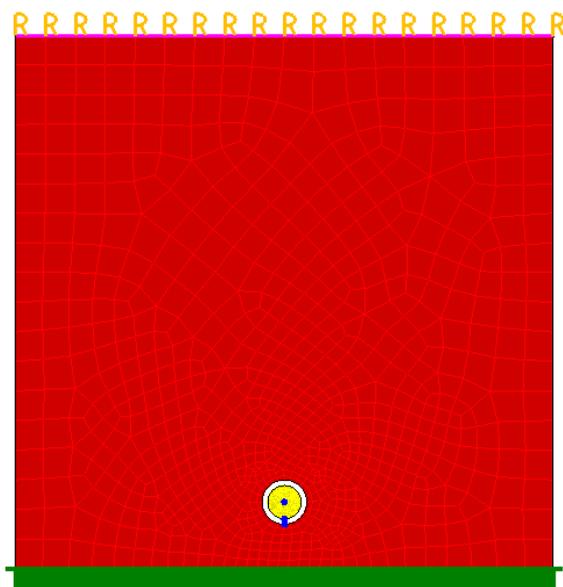


**Figura 2.22 Visualización del proceso de selección de superficies**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

*Con esto haciendo un rectángulo de selección en la parte inferior del elemento uno se hace clic y se selecciona “**Surface Controller Temperatures**” y se asigna el valor de 324.82K con  $10e8$  para el valor de “**Stiffnees**”.*

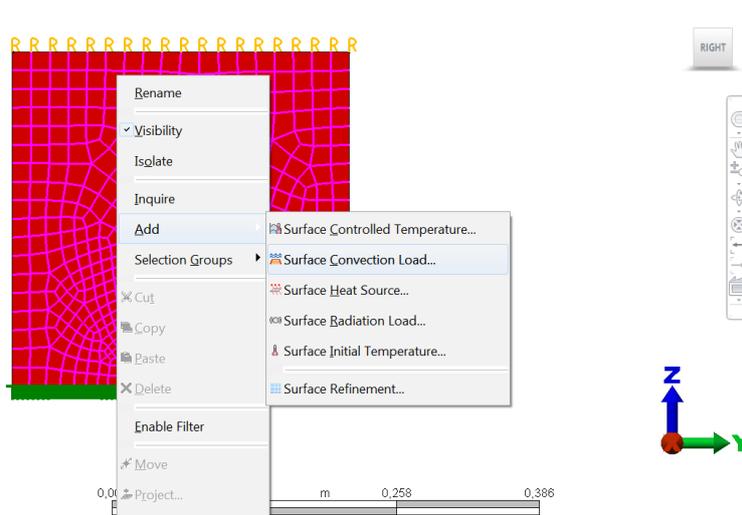
*Para ingresar la temperatura interior del horno con el respectivo valor de la función de campo de radiación, se selecciona la parte superior del elemento dos y con un “**clic derecho**” se selecciona “**Surfaces Radiation Loads**”, donde el valor de la temperatura es de 922.03K y la función de campo es de 0,7. Una vez ingresado estos valores se una superficie tal como la que se muestra en la Figura 2.23.*



**Figura 2.23 Asignación de radiación al modelo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Como ultima carga aplicada al modelo es la convección que se asigna a la superficie del elemento dos, y con un “clic derecho” en “Add” > “Surface Convection Load”, en “temperature independent Convection Coefficient” un valor de  $3532.33 \text{ J}/(\text{sKm}^2)$  y para “temperature” igual a  $294.26\text{K}$ , los pasos descritos, se muestran en la Figura 2.24.

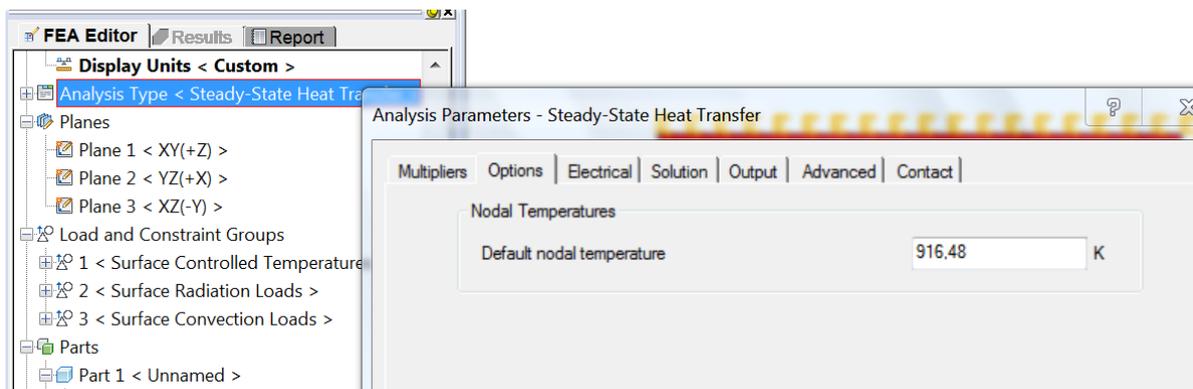


**Figura 2.24 Asignación de convección al flujo de la parte tres del modelo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Una vez ingresado los valores de las cargas se edita los parámetros del sistema.

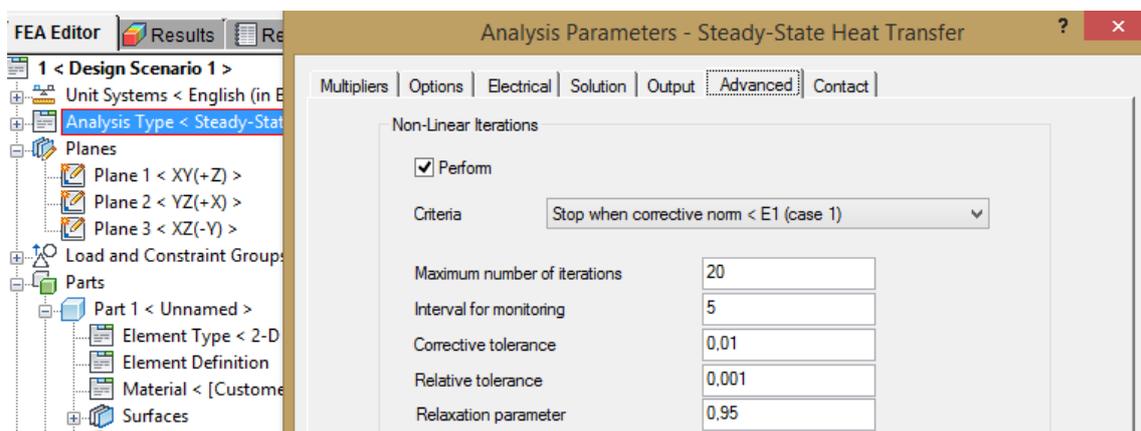
12.- Con un “clic derecho” en “Analysis type” y seleccionando “Edit Analysis Parameters”, pestaña “Options” se asigna el valor 916.48 K en “Default nodal temperatura” como base para el proceso iterativo, tal como aparece en la ventana del análisis de parámetros del sistema de la Figura 2.25.



**Figura 2.25 Asignación de una temperatura nodal inicio para el proceso iterativo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

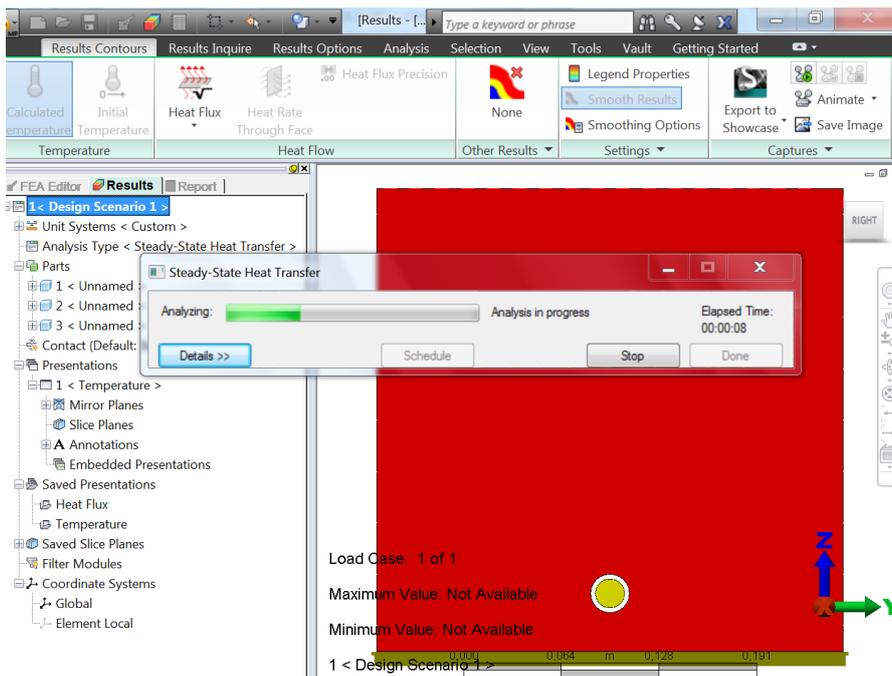
13.- Siendo este el proceso final de condiciones para la simulación es donde se ingresa el número de iteraciones, tolerancia correctiva y relación de parámetros que tendrá este modelo, esto se aprecia en la Figura 2.26.



**Figura 2.26 Asignación de parámetros del modelo antes de correr la simulación.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

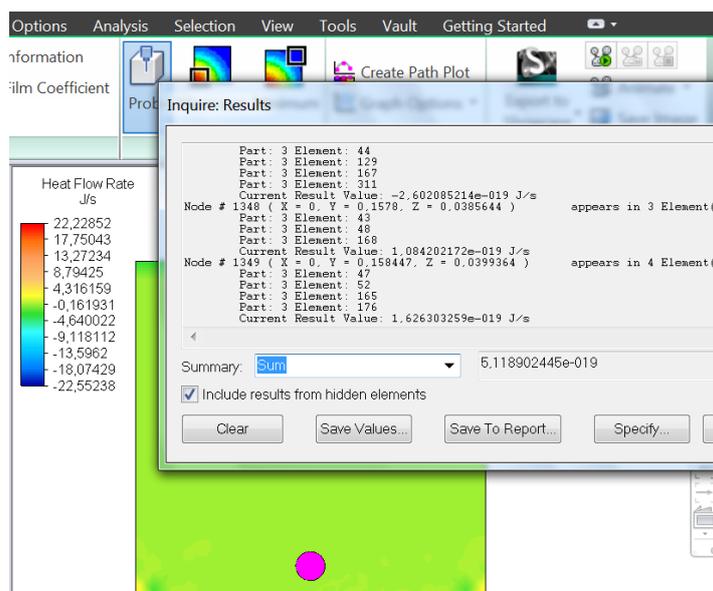
14.- Se procede a la simulación haciendo clic en “Analysis” y seleccionando “Run Simulation”, seguido todos los pasos se tiene un avance de simulación como se indica en la Figura 2.27.



**Figura 2.27 Ejecución de la simulación del ejemplo demostrativo de transferencia de calor bajo el régimen de estado estable.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

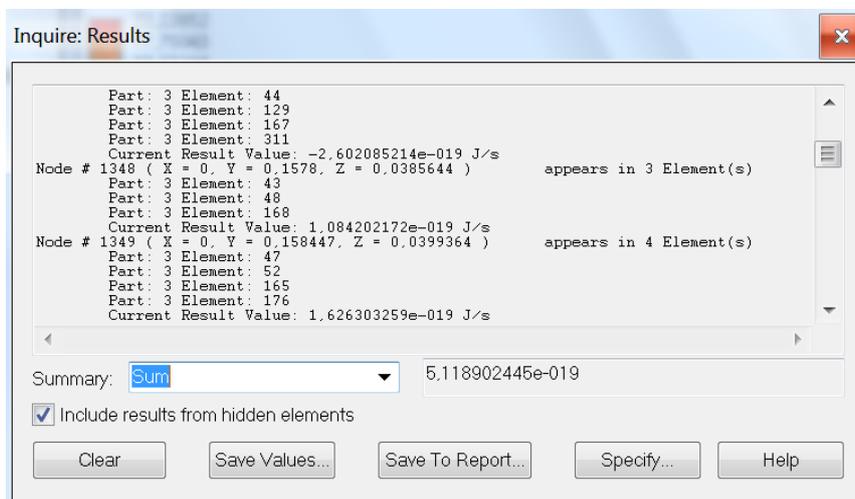
Se considera la ventana de resultados de la Figura 2.28 para indicar las opciones de resultados, en este caso se necesita conocer el valor de la cantidad de calor transferida a la tubería de agua refrigerada.



**Figura 2.28 Visualización del Resultado Requerido por el Análisis**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Para mostrar la ventana de resultados se consigue haciendo clic en la pestaña “**Result inquire**”, luego “**Current result**” y en “**Summary**” se elige “**Sum**” como opción para el flujo de calor de la “**parte 3**”, esto se indica en la Figura 2.29.



**Figura 2.29 Resumen de resultados para el flujo de calor**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Siendo  $5.12 \text{ e-19 J/s}$  el valor de la tasa de calor ganada por pie cuadrado de tubería.

## 2.4.2 Análisis Térmico en Estado Transitorio

Este tipo de análisis se utiliza para determinar la distribución de temperatura y flujo de calor en un elemento donde la temperatura está en función del tiempo, este tipo de análisis de estado transitorio se muestra en la Tabla 2.3.

Las constante de calor específico y la densidad del material son útiles para este análisis, en este estado, se tiene la capacidad para simular cambios de fase como fusión o congelación estableciendo el modelo de un material de una pieza.

Considerando que es un análisis de transferencia de calor no se consideran efectos debido a los movimientos del líquido.

Haciendo referencia a un ejemplo teórico del programa se muestra lo siguiente:

El procesador calcula el cambio de estado de unos cuantos hielos de sólido a líquido. Estos no modelan el flujo de agua resultante ni tampoco el transporte de calor a través de los efectos de empuje, asumiendo que estos hielos están sobre una mesa.

Igual que el estado estacionario puede ser lineal o no lineal, tomando en cuenta que al momento de que sea no lineal en estado transitorio el valor de la conductividad y flujo de calor debido a la radiación son constantes para cada paso de tiempo por lo que el valor siguiente de una iteración es lineal.

**Tabla 2.3 Tabla Representativa del Estado Transitorio de Transferencia de Calor**

ESTADO TRANSITORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Temperatura = f(t)		
TIPO	CARGAS	CONSTANTES EN CONSIDERACIÓN
LINEAL	- Conducción	- Calor específico
	- Convección	- Densidad
	- Generación interna de calor	
	- Aplicación del coeficiente de transferencia de calor	
	- Flujo de calor por unidad de área	
NO LINEAL	- Conducción en función de la temperatura	- Calor específico
	- Radiación	- Densidad
	- Radiación Cuerpo a Cuerpo	- Conductividad = f(tiempo)
	- Cargas térmicas como función de la temperatura	- Radiación = f(Temperatura)

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

### 2.4.2.1 Ejemplo Demostrativo para el Análisis Térmico en Estado Transitorio

El siguiente ejemplo consiste en saber la temperatura interna de un cilindro el cual se muestra en la Figura 2.30, inicialmente tiene 600K de temperatura inicial y es de acero inoxidable (AISI 304) sumergido en aceite a una temperatura de 300K.

El medio de transferencia de calor, por convección y el tipo de análisis es lineal.

El resto de datos se detalla a continuación,

$$h = 500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

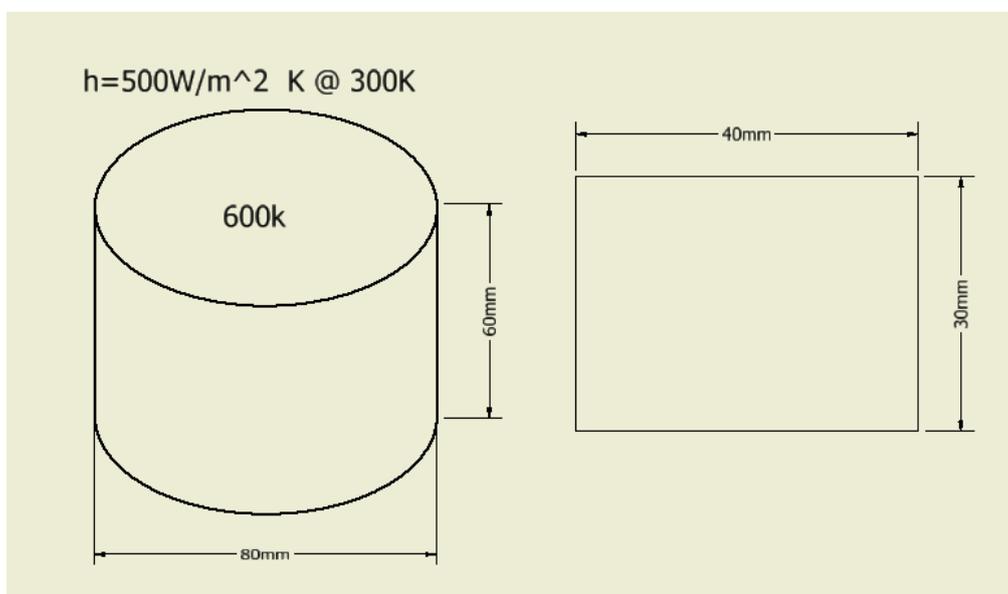
**Longitud del cilindro**= 60mm.

**Diámetro del Cilindro** = 80mm.

$$\rho = 7900/\text{m}^3$$

**Coefficiente de conducción** = 17,4 W/m.K.

**Calor específico** = 560 J/ Kg K



**Figura 2.30 Representación gráfica del modelo para el análisis transitorio**

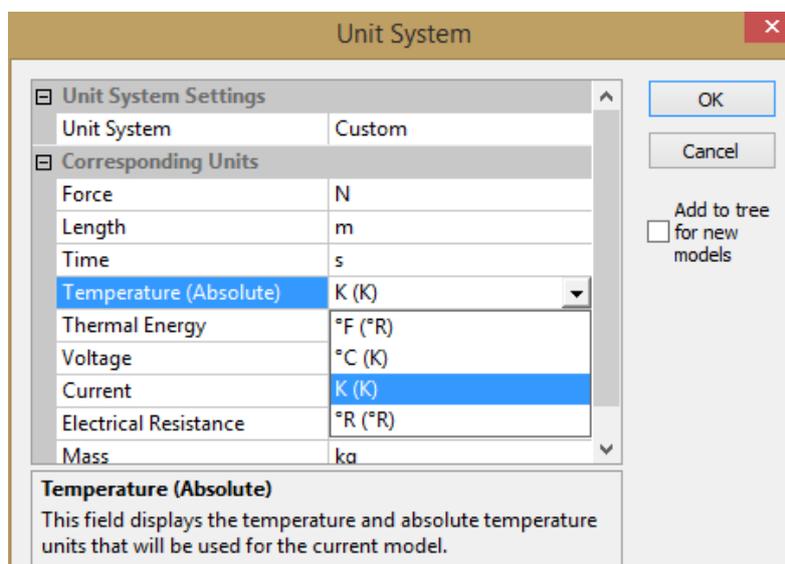
Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

Para la resolución de este ejemplo se procede a crear un modelo Axi simétrico en 2D, luego este modelo una vez ingresado los parámetros y realizada la primera simulación se procederá a

generar una fracción del cilindro en 3D para un análisis de resultados los cuales se comparara con los valores teóricos del ejemplo.

1.- En el programa *Autodesk Simulation Multiphysics 2013*, se selecciona un nuevo caso de análisis esta vez del tipo *“Thermal: Transient Heat Transfer”*.

2.- Se selecciona un sistema de unidades en este caso *“Metric mks (SI)”*, usando unidades Kelvin para la temperatura, para ello se hace clic en *“Override Default Units”* y se selecciona *“Metric mks (SI)”*, para cambiar a Kelvin en *“Unit System”* se selecciona *“Custom”* y en *“Temperature Absolute”* K (K), como se indica en la Figura 2.31.

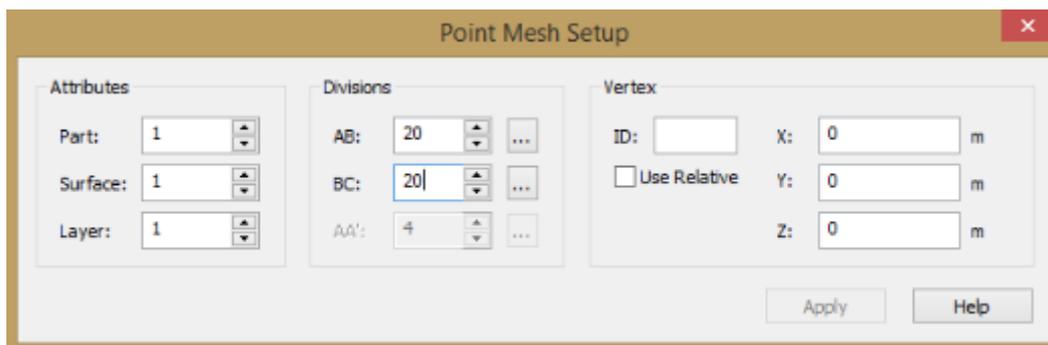


**Figura 2.31 Selección del sistema de unidades y asignación de unidades para la temperatura en el sistema métrico mks (SI)**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

3.- Ahora usando la pestaña *“Mesh > Structure mesh > 4 Point Rectangular”*, se crea una nueva estructura de malla.

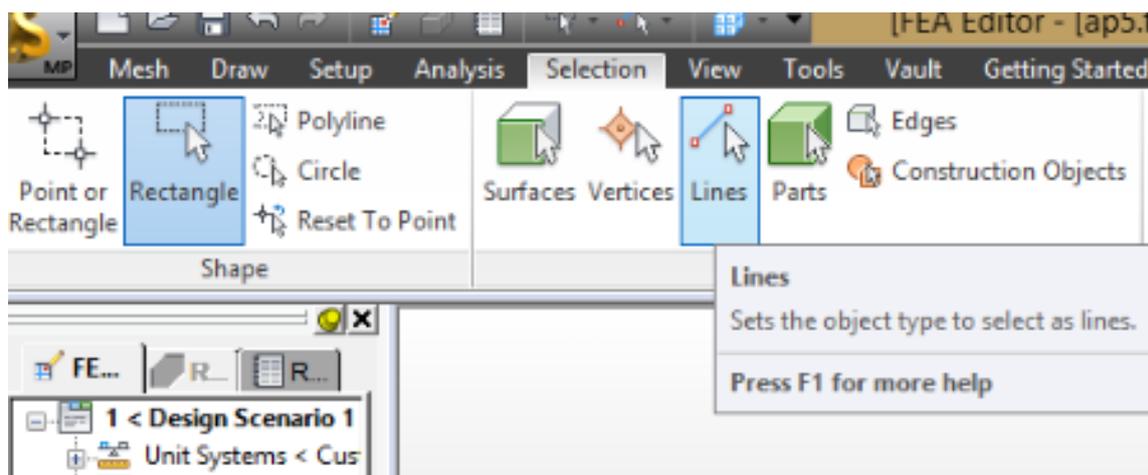
4.- Se asigna a *“Part”* y *“Surface”* igual a 1. El número de divisiones para *“AB”* y *“BC”* igual a 20 con los siguientes vértices. Para el punto A (0, 0,0) *“Intro”*, B (0,0.40, 0) *“Intro”*, C (0, 0.040,0.030) *“intro”* y D (0, 0,0.030) *“intro”*, tal como se muestra en la Figura 2.32.



**Figura 2.32 Generación de un mallado a partir de cuatro puntos.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

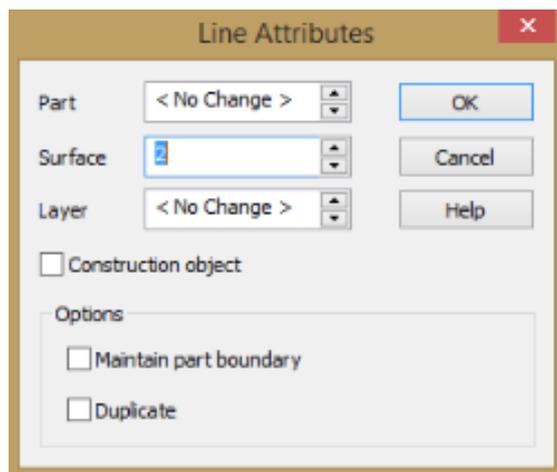
5.- Ya generado el mallado y seleccionando “*Right View*”, se procede a seleccionar las líneas superior y lateral derecha del modelo usando “*Selection > Shape>Rectangle y Selection> Select > lines*”, de acuerdo a lo indicado se puede ver el interfaz de selección de la Figura 2.33.



**Figura 2.33 Proceso para seleccionar lineal del modelo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

6.- Seleccionado las líneas requeridas del modelo y usando “*Draw> Modify>Attributes*” para pasar a la superficie 2, como se observa en la Figura 2.34.

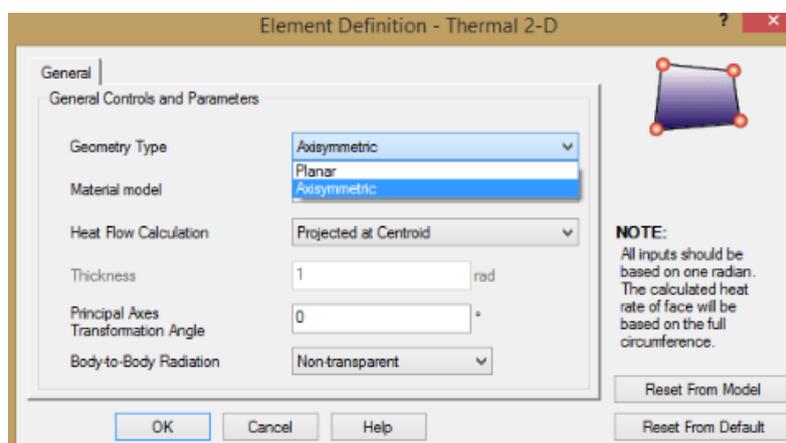


**Figura 2.34 Asignación de una nueva superficie a partir de dos líneas.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

7.- Terminado el paso seis se tiene ya un modelo 2D y la base para la generación de un modelo 3D representativo del cilindro, se procede a ingresar las propiedades del modelo inicial.

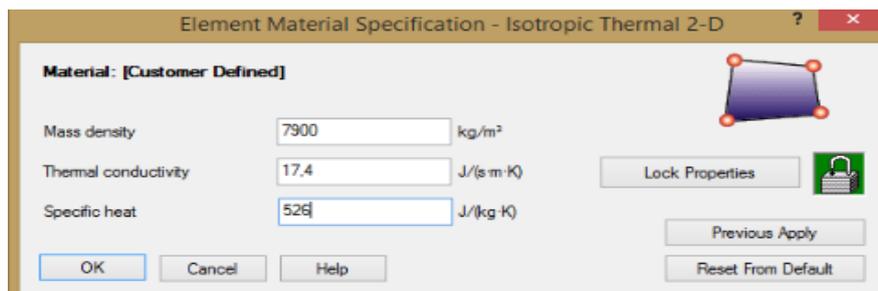
En “*Element Type*” parte uno y “clic derecho” en “*Element Definition*” para seleccionar “*Edit Element Definition*”, el tipo de geometría es del tipo “*Axisymmetric*”, la definición de elementos se la muestra en la Figura 2.35.



**Figura 2.35 Asignación del tipo de geometría al modelo 2D creado.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

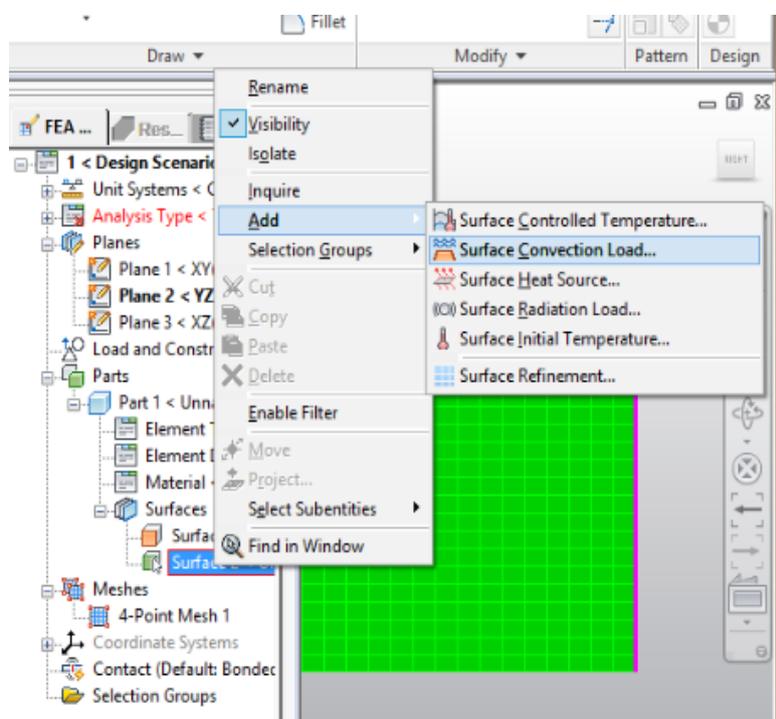
8.- Haciendo clic derecho en “*Material*” parte, seleccionando “*Edit Material*” se elige “[*Customer Definition*]”, “clic” en “*Edit properties*” y se ingresa los siguientes valores: densidad = 7900, conductividad térmica 17.4 y calor específico = 526, valores mostrados en la Figura 2.36.



**Figura 2.36 Asignación de propiedades material del cilindro**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

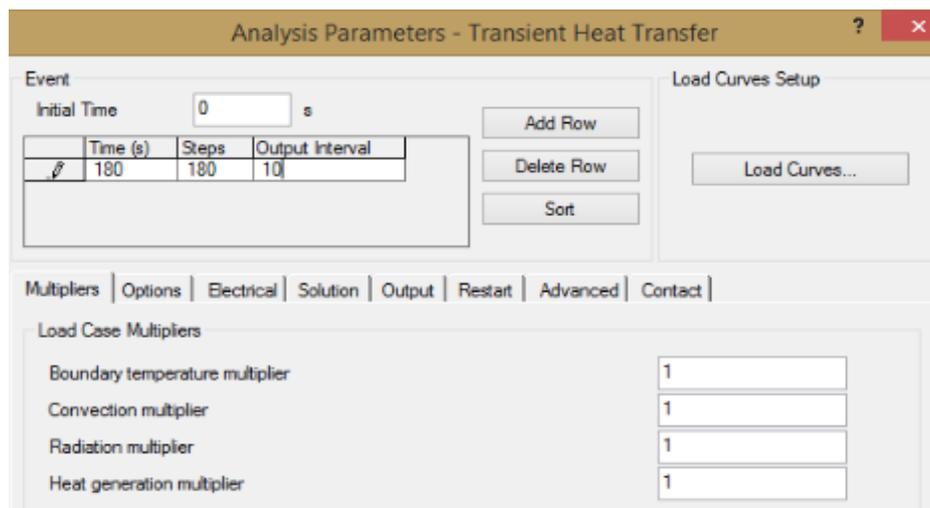
9.- Haciendo clic en la siguiente superficie generada a partir de las dos líneas se selecciona “Add > “*Surface Convection load*” con valor 500 en temperatura independiente del coeficiente de convección y 300 para la temperatura ambiente, tal como se muestra en la Figura 2.37.



**Figura 2.37 Selección de la superficie dos para agregar al modelo la carga de convección.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

10.- Ahora se edita los parámetros del análisis transitorio del modelo, se estima un tiempo de 180 segundos, con intervalos de 10, esto se realiza haciendo “*clic derecho*” en “*Analysis type*” para seleccionar el comando “*Parameters*”, en la tabla que sale para estimar el tiempo de análisis se ingresa los valores como se muestra en la Figura 2.38.

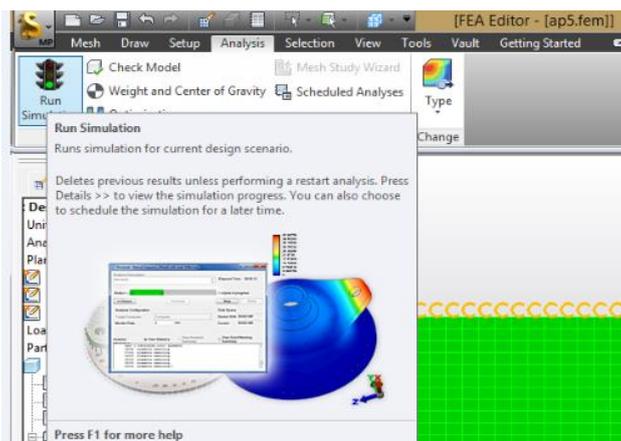


**Figura 2.38 Asignación de parámetros característicos de un análisis de régimen transitorio.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

11.- Con respecto a la Figura 2.38 se hace “*clic*” en “*Options*” se ingresa el valor de la temperatura nodal por defecto igual a **600**, además en la opción “*Advanced*”, como no hay valores no lineales se asigna un valor de “*cero*” para el numero de pasos de tiempo en la formulación de la matriz.

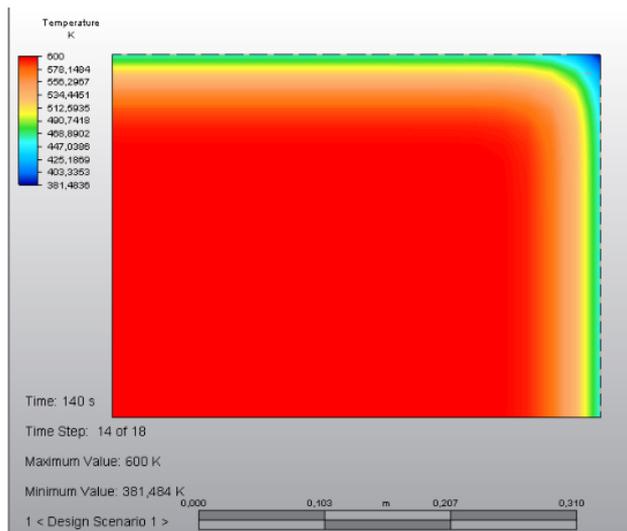
12.- Luego de asignar propiedades al material, parámetros al modelo se procede a simular seleccionando “*Analysis > Analysis > Run*”, tal como se indica en la Figura 2.39.



**Figura 2.39 Corrida para la simulación del modelo en 2D**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

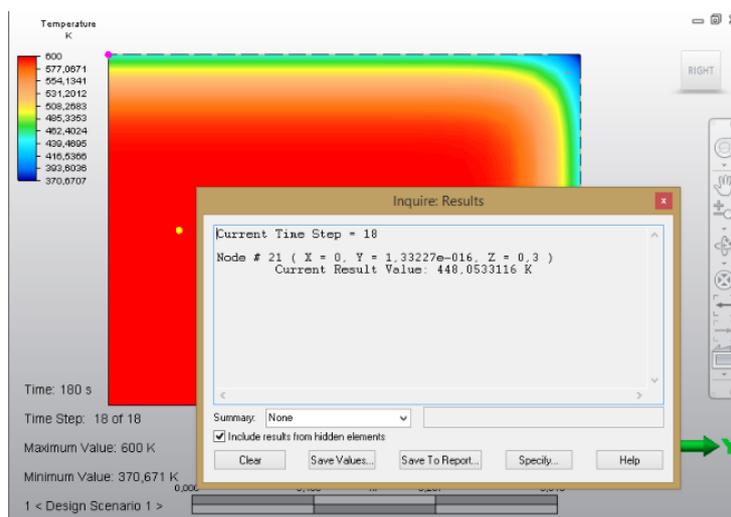
13.- Se necesita saber cuál es la temperatura al centro de la cara circular, dando como resultado de la simulación de acuerdo a la Figura 2.40.



**Figura 2.40 Simulación del modelo en 2D**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

14.- La temperatura para en centro de la cara circular en el nodo # 21 es de 448.053 K, tal como se indica en la Figura 2.41.



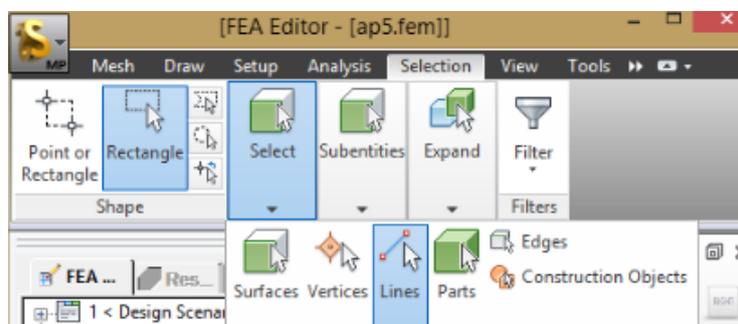
**Figura 2.41 Temperatura del nodo central de la cara circular del modelo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation multiphysics 2013.

15.- En referencia a los parámetros del modelo en dos dimensiones se crea un nuevo escenario para lo cual se procede de la siguiente manera:

Haciendo clic en “*FEA Editor*” retornando al escenario de análisis, se hace “*clic derecho*” en “*Design Scenario 1*” y seleccionando “copy” se genera un nuevo escenario donde se selecciona

todas las líneas del modelo con un “clic” en “*Selection*” > “*Select*” > “*lines*” y en “*Selection*” > “*Select*” > “*All*”, tal como se muestra en la Figura 2.42.



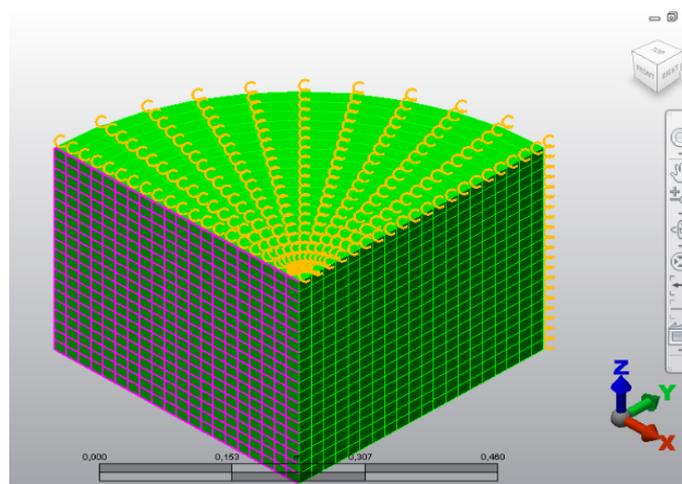
**Figura 2.42 Selección del mallado 2D del modelo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

**16.-** Para generar el modelo 3D se sigue los siguientes pasos:

A partir de “*Draw*” > “*Patern*” > “*Rotate or Copy*”, activando “*check box*”, “*type*” igual a 10 y activando “*check box Join*”.

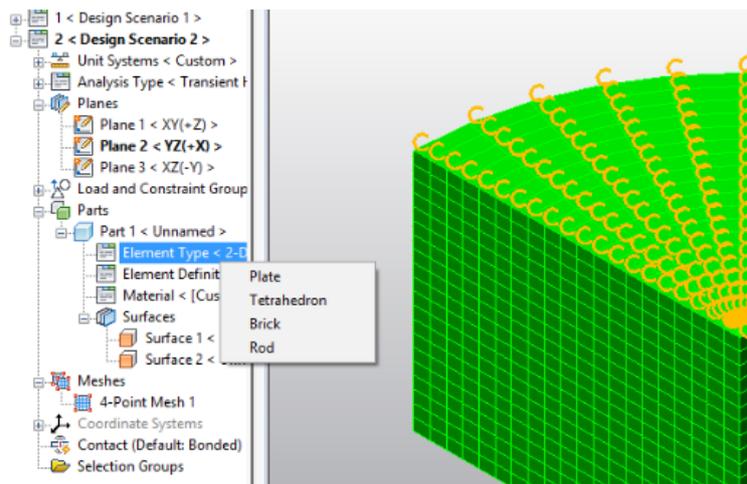
En “*DZ*” se asigna el valor de 90, para girar en el punto de coordenadas (0, 0,0), ya se tiene el modelo 3D basta hacer clic en “*View*” > “*Navigate*” > “*orientation*” > “*Isometric View*”, se tiene un resultado semejante al de la Figura 2.43.



**Figura 2.43 Modelo 3D para el modelo del cilindro.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

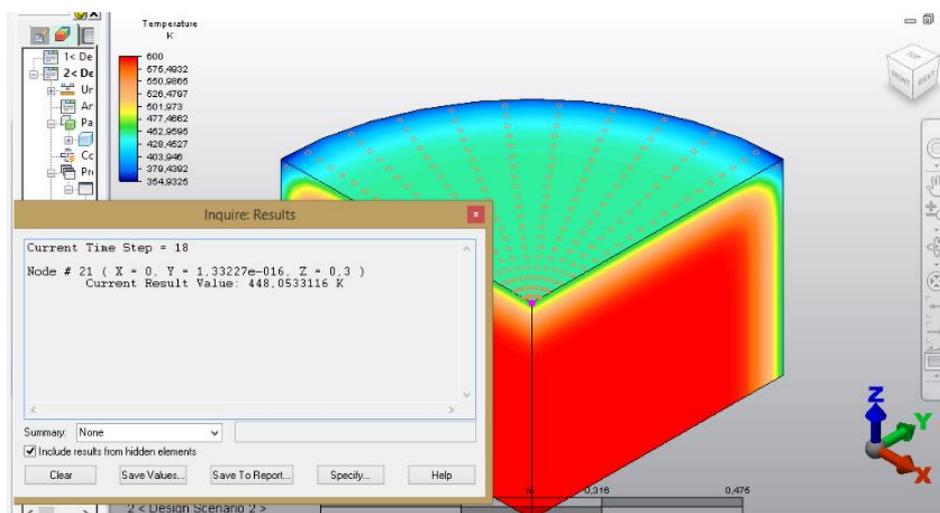
**17.-** Solo queda asignar el valor para el tipo de elemento, haciendo clic derecho en “**Element type**” para la parte “**uno**” y se selecciona “**Brick**”, tal como se puede ver en la Figura 2.44.



**Figura 2.44 Asignación del tipo de elemento para el modelo.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

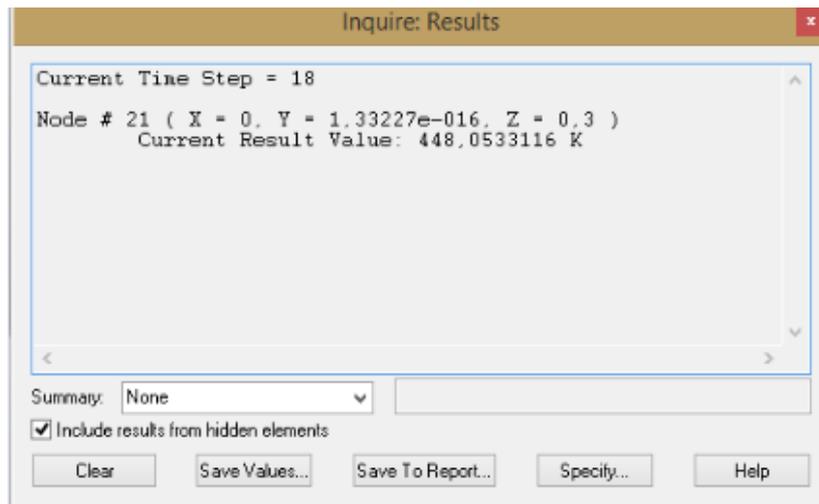
18.- Ahora se procede a simular, clic en “*Analysis*” > “*Analysis*” > “*Run*”, para obtener el resultado necesario de este escenario de simulación, resultados como los que se muestran en la Figura 2.45.



**Figura 2.45 Resumen de la simulación en 3D del modelo**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Dando como resultado para el nodo # 21  $T = 448,053$  K, de acuerdo a la ventana de la Figura 2.46.



**Figura 2.46 Temperatura del nodo de la cara circular del modelo en 3D.**

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Luego a realizar la simulación en 2D y 3D del modelo del cilindro se tiene los siguientes valores para el nodo #21 mostrado en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Cuadro comparativo de la temperatura del nodo #21 del modelo.**

<b>Temperatura en 180 segundos</b>	
<b>Centro de la cara circular</b>	
Análisis 2D	448.053 K.
Análisis 3D	448,053 K

Fuente: Entorno de Desarrollo Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

## **CAPÍTULO III**

### **MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA DESHIDRATAR ALFALFA.**

En este capítulo se desarrolla todo lo que concierne al modelamiento y simulación para establecer las condiciones de funcionamiento de un secador de banda para la deshidratación de alfalfa.

#### **3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PROCESO DESCRIPTIVO DEL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA**

De acuerdo a los capítulos anteriores se ha establecido las condiciones a las que se puede desarrollar un proceso de deshidratación de alfalfa en base a pruebas de secado experimental para establecer las condiciones de secado y variables involucradas en el entorno de desarrollo de Autodesk Simulation Multiphysics.

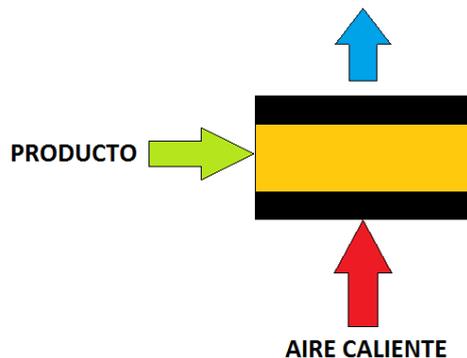
Ahora en este capítulo se da a conocer la estructuración del problema y desarrollo de una hipótesis para llegar a una solución mediante el ingreso de variables, constantes y condiciones que rigen el comportamiento de un secador de banda y la complementación de ensayos con sus respectivas simulaciones en Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

##### **3.1.1 Condiciones para el modelamiento de un secador de banda para la deshidratación de alfalfa.**

De acuerdo a la información que se da a conocer del proceso de deshidratación de alfalfa en el primer capítulo se muestra las condiciones a las que se va a dar el proceso de modelamiento

del secador de banda, a continuación se muestra las condiciones de entrada para el proceso:

**Tipo de secador:** De paso simple



**Figura 3.1 Representación de un secador de banda transportadora de paso simple sin realimentación de aire caliente.**

**Tipo de alimentación:** De banda transportadora



**Figura 3.2 Diagrama de la alimentación por banda transportadora al secador de banda.**

**Comportamiento del secador:** Modelos de diseño experimental que rigen las condiciones del aire de secado y condiciones de la alfalfa.

**Condiciones del aire de secado a 1 atm:**

### *Humedad*

El contenido de humedad del aire de secado está considerado en función de la temperatura de secado y el contenido de humedad relativa para el secado, información que se obtiene en base al diagrama psicrométrico.

- Humedad inicial: 0,01 Kg/Kg de aire seco

- Humedad final: 0,067 Kg/Kg de aire seco

### ***Temperatura***

La temperatura del aire de secado esta dado de acuerdo al modelo experimental para temperaturas altas que se describe en el primer capítulo, la temperatura de secado que se ha elegido en este trabajo se de 393.00K, el estudio experimental recomienda una temperatura de 433.00K como mejor elección pero existe el caso de que el diagrama psicométrico que se utiliza actualmente para temperaturas altas llega hasta 393K como temperatura de bulbo seco. Se tiene como temperatura de bulbo húmedo a una humedad relativa del 5% igual a 333.00K.

### ***Constantes involucradas en el ingreso de parámetros para el modelamiento.***

- Calor específico: 1,014 KJ/Kg .K
- Densidad: 0,8711 Kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad dinámica: 230.1e-7 N.s/m<sup>2</sup>

Las constantes que se involucra para el modelamiento como parámetros de ingreso para el comportamiento del modelamiento del secador de banda transportadora son valores que se muestran las tablas de condiciones termo físicas del aire información mostrada en el Anexo B.

### **Condiciones para la alfalfa**

#### ***Humedad***

Esta constante se tiene de acuerdo a las condiciones de iniciales de humedad que tiene la muestra para este trabajo se considera una humedad inicial de 78.32%.

La humedad a la que se debe llegar después del secado es del 8% de acuerdo a lo requerido para producir cubos de alfalfa.

### ***Temperatura***

La temperatura a la que inicialmente esta la alfalfa es a temperatura ambiente por lo general de 298.15K.

La temperatura a la que la alfalfa sale del secado de acuerdo a la temperatura de bulbo húmedo de secado de 333.00K aproximadamente.

### ***Forma***

Normalmente la alfalfa que está destinada para el secado, ingresa picada y aplastada en trozos de 50mm.

### ***Modelo ideal***

Se ha optado en realizar un modelo ideal, para ello se ha elegido destinar tres arreglos de cilindros de 50mm de diámetro y 1000mm de longitud, con respecto a una cámara modelo de secado de un metro cuadrado de área de secado.

### ***Madurez***

El estado de madurez como ya se ha hablado en el primer capítulo se recomienda de que sea en base al 10% de la floración de la alfalfa.

### ***Constantes involucradas en el ingreso de parámetros para el modelamiento.***

Calor específico = 2.55KJ/Kg.K.

Conductividad térmica 0.29 W/m.K.

Densidad= 90.00Kg/m<sup>3</sup>.

**Medio de transferencia de calor:** Convección.

**Coefficiente de transferencia de calor:**

$h_y = 3,43 W/m^2 \cdot K$ , dado para el lecho de secado.

**Coefficiente de convección forzada:**  $h = 30.00 W/m^2 \cdot K$ 

Las condiciones de secado se basan en la combinación de tres arreglos representativos del lecho de secado, tres velocidades para el flujo del aire de secado a una temperatura de secado previamente prevista de 393.15K, los ensayos se los realiza de acuerdo a la Tabla 3.1.

**Tiempo de secado:** 8.4 min ó 500 segundos aproximadamente.

**Tabla 3.1 Comportamiento de combinaciones para el modelamiento del secador de banda transportadora.**

CONDICIONES DE SECADO			
T=393.15K	VELOCIDAD(m/s)		
ESPESOR(mm)	0.3	0.60	1.00
50	1	2	3
100	4	5	6
150	7	8	9
PRUEBAS DE SIMULACIÓN			

Los ensayos que se propone en este trabajo se los desarrolla en el programa Autodesk Simulation Multiphysics 2013; Las características del equipo que se usa son las siguientes:

*Procesador Core i5 de 3.6Mhz, Memoria Ram de 8 gigas, Memoria Gráfica NVIDIA 2 gigas dedicadas y un disco duro de 1 Terabyte.*

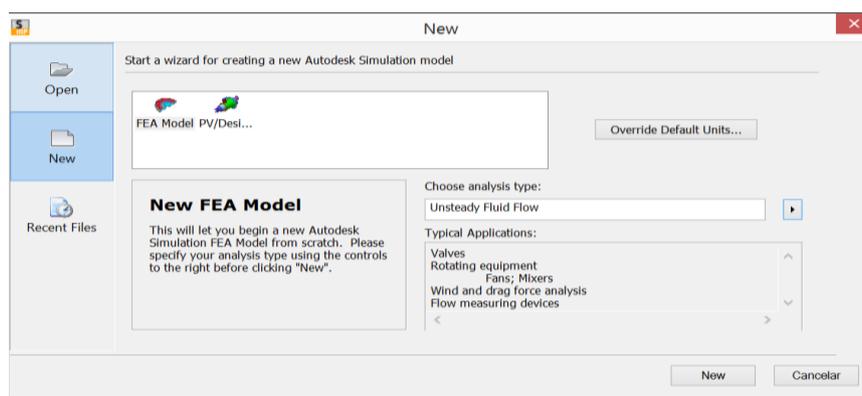
### **3.2 DESARROLLO DEL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALFALFA**

Cuando se estudia un sistema se necesita conocer su comportamiento y para ello se sigue una secuencia de experiencias, partiendo de un comportamiento experimental ya sea en base a un prototipo o un modelo del sistema el cual puede ser físico o matemático. Para llegar a identificar



### 3.2.2 Ingreso de Coordenadas de los elementos involucrados en el modelamiento del secador de banda en el entorno de Simulación Multiphysics de Autodesk

Lo primero que hay que hacer es configurar el tipo de unidades y análisis, en este caso usando el sistema internacional de medida (SI), luego el entorno de simulación en estado inestable para el flujo de fluidos tal como se indica en la Figura 3.4.

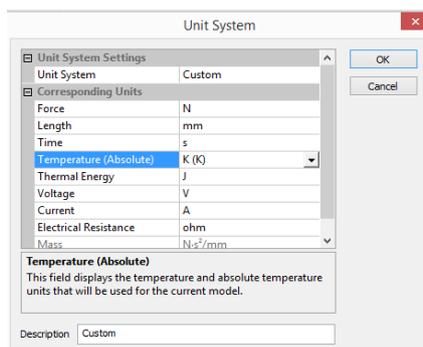


**Figura 3.4 Configuración del entorno de simulación**

Como base principal para el análisis se ha decidido establecer dos escenarios de simulación, el primer escenario se lo realiza en el entorno de simulación de flujo transitorio con la finalidad de ver el comportamiento de la velocidad del aire de secado.

El segundo escenario esta dado para mostrar el comportamiento de la temperatura de secado, usando el entorno de simulación bajo régimen estacionario de transferencia de calor, con la finalidad de mostrar el proceso de secado usando como medio de transferencia de calor la convección, los resultados de la simulación del primer escenario son la base para dotar del fluido de convección en el segundo escenario, a continuación se muestra este proceso de configuración.

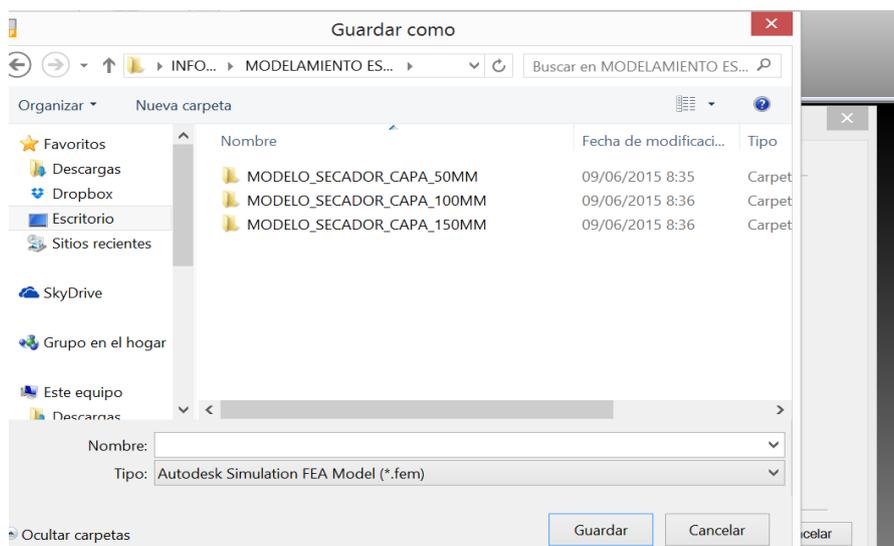
La configuración de unidades se ha establecido usar mediante el SI, cambiando las unidades por defecto para las unidades de longitud de metros a milímetros y los grados Centígrados a unidades Kelvin, como se aprecia en la Figura 3.5.



**Figura 3.5 Configuración de unidades del Modelo**

De acuerdo a la Tabla 3.1 de ensayos de simulación, se ha decidido crear tres carpetas conforme a lo que determina el arreglo para el espesor representativo del lecho de secado de alfalfa.

Una vez asignado unidades en el entorno Multiphysics se guardó cada archivo en la carpeta correspondiente, para la muestra de 50mm con el nombre de “MODELO\_ 50MM”, lo mismo se hace para los espesores de 100 y 150mm, esto tal como se muestra en la Figura 3.6.



**Figura 3.6 Creación de carpetas para el modelamiento del secador de banda transportadora**

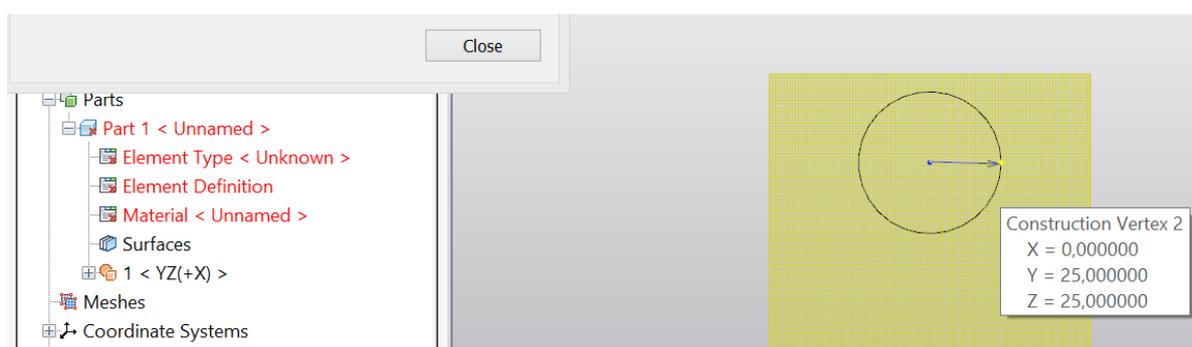
Como base inicial hay que elegir un plano de trabajo en este caso se elige el plano 2 < YZ (+X) del entorno de Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Luego de la configuración inicial se ingresa las coordenadas de los elementos involucrados, primero se ingresa las coordenadas de los elementos correspondientes al lecho de secado, como se indica en la Figura 3.7.

Se ingresa las coordenadas iniciales del primer elemento que representa el lecho de secado.

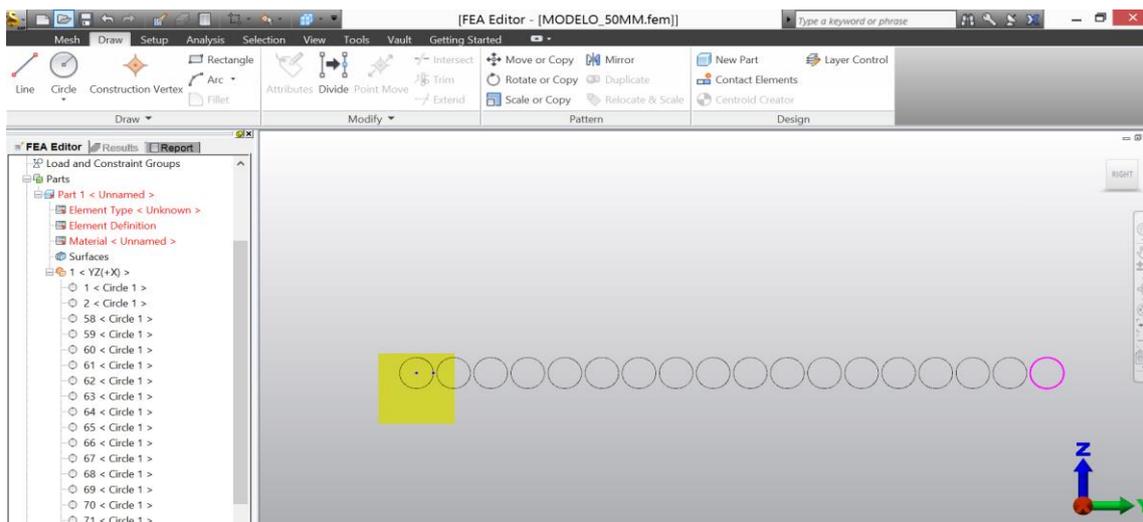
X= 0.00 Y= 25.00 Z= 0.00

RADIO 25.00



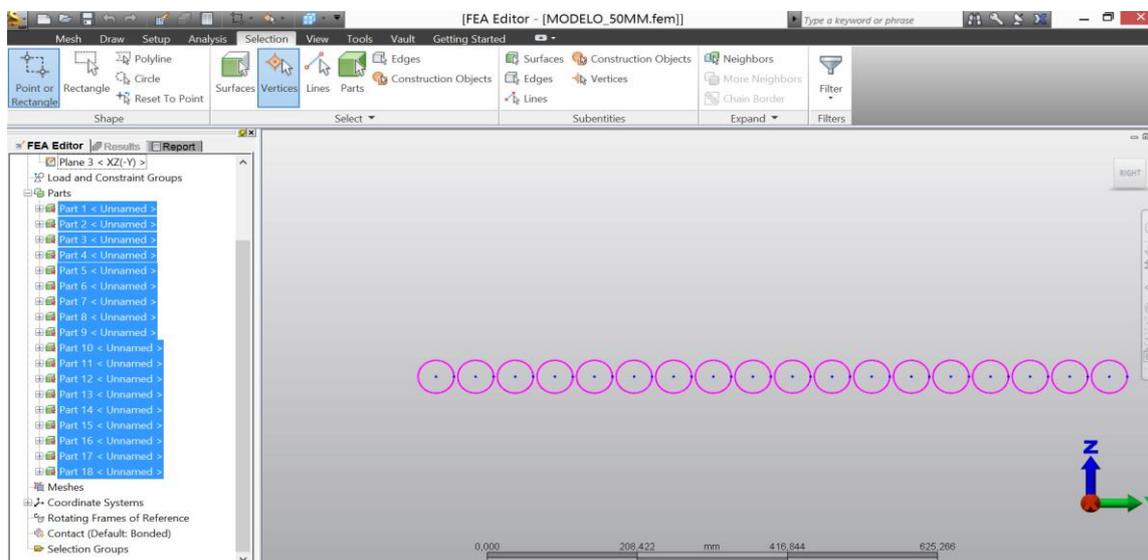
**Figura 3.7 Ingreso de las coordenadas primer elemento del lecho de secado**

Ahora se procede a copiar el primer elemento no sin antes seleccionar la geometría que se desea copiar para formar una matriz de 1 x18 que es el equivalente de un lecho de secado de espesor igual a 50mm y de ancho 1000mm, la longitud de los cilindros que conforman el arreglo se ingresa como parámetro de configuración del elemento, el arreglo para el lecho de secado se semejante al de la Figura 3.8.



**Figura 3.8 Selección y distribución elementos del lecho de secado**

Por defecto estos elementos se han creado con las mismas características de número de parte situación que no es apropiada, para ello se debe editar las propiedades constructivas y cambiar estas propiedades para los 18 elementos que conforman el lecho de secado del arreglo de 50mm de espesor, la selección de los elementos tal como se muestra en la Figura 3.9.



**Figura 3.9 Cambio de atributos de los elementos del lecho de secado de 50mm**

El cambio de atributos aplica cambio de número de parte manteniendo igual, la superficie y capa para todos los elementos del lecho de secado.

Una vez realizado el cambio de atributos para el lecho de secado se procede a crear el elemento 19 que está conformado de 18 partes que tienen las mismas coordenadas de los elementos

anteriores, las coordenadas del contorno interno de la cámara de secado se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Coordenadas internas de la cámara de secado**

RECORRIDO AIRE DE SECADO		
X	Y	Z
00.00	-175.00	-185.00
00.00	-175.00	-35.00
00.00	425.00	-35.00
00.00	425.00	1115.00
00.00	275.00	1115.00
00.00	275.00	965.00
00.00	-325.00	965.00
00.00	-325.00	-185.00
00.00	-175.00	-185.00

Se hace esto para poder representar los espacios que recorrerá el aire de secado, con una capa de secado de 50mm de espesor, de igual forma se crea el recorrido para los espesores de 100mm y 150mm.

En la Tabla 3.3 se muestra las coordenadas que conforma geometría del aislante térmico de la cámara de secado.

**Tabla 3.3 Coordenadas del aislante térmico de la cámara de secado**

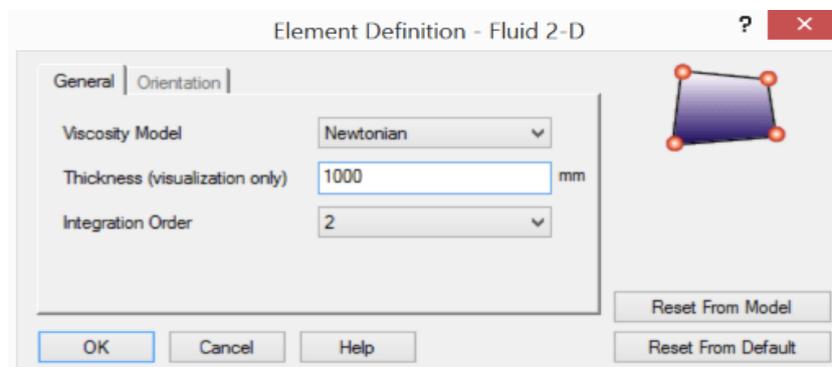
AISLANTE SUPERIOR		
X	Y	Z
00.00	-175.00	-185.00
00.00	-175.00	-35.00
00.00	425.00	-35.00
00.00	425.00	1115.00
00.00	475.00	1115.00
00.00	475.00	-85.00
00.00	-125.00	-85.00
00.00	-125.00	-185.00
00.00	-175.00	-185.00

AISLANTE INFERIOR		
X	Y	Z
00.00	-325.00	-185.00
00.00	-325.00	965.00
00.00	275.00	965.00
00.00	275.00	1115.00
00.00	225.00	1115.00
00.00	225.00	1015.00
00.00	-375.00	1015.00
00.00	-375.00	-185.00
00.00	-325.00	-185.00

Ahora se configura las características del elemento como tipo, definición y tipo de material.

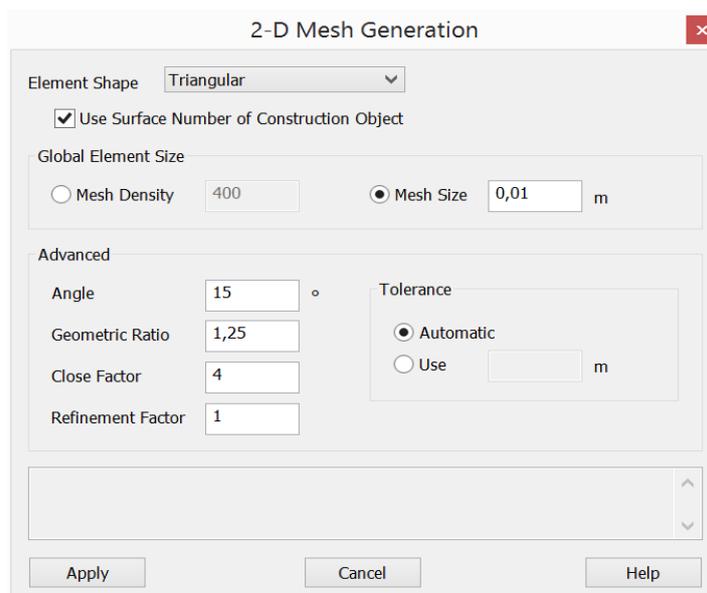
Como propiedades para el flujo de aire se elige como tipo de material < Planar 2D >.

La tercera dimensión se configura en la definición del elemento, de acuerdo a la Figura 3.10.



**Figura 3.10 Asignación de la tercer dimensión al flujo de aire**

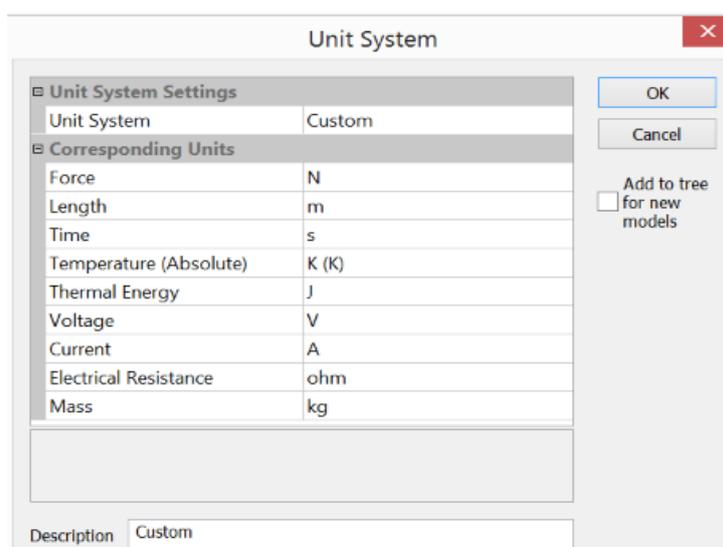
Como siguiente paso es el mallado general de todos los elementos que conforman la cámara de secado de acuerdo a lo que se muestra a continuación en la Figura 3.11.



**Figura 3.11 Configuración del mallado de la cámara de secado**

Para el escenario de simulación solo se necesita el elemento que constituye el aire de secado, el resto de elementos de la cámara de secado se los oculta hasta hacer uso de ellos en el segundo escenario.

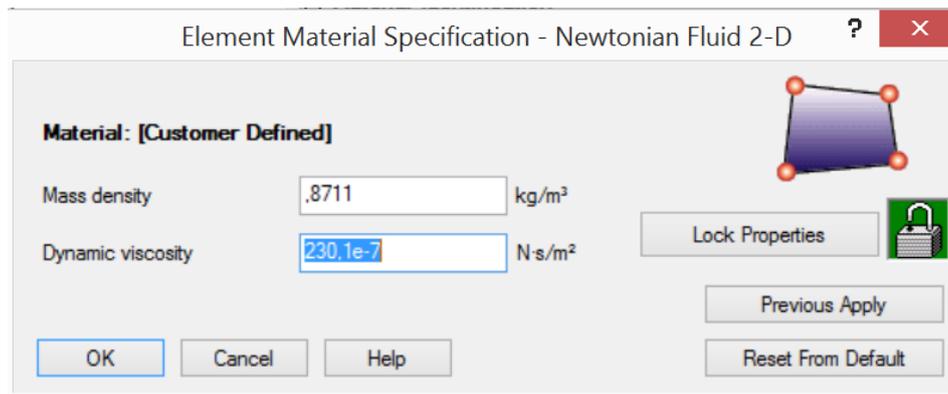
Una vez realizado los mallados respectivos se procede a configurar el modelo, para ello primero hay que tener en cuenta las unidades de longitud ya que esta en mm y es necesario pasar a metros lineales, tal y como se muestra en la Figura 3.12.



**Figura 3.12 Cambio de Unidades para asignar propiedades del flujo de aire**

Con el cambio anterior de las unidades, se ingresa los valores de densidad y viscosidad dinámica para el aire de secado a 393.00K, valores ingresados en la ventana de la Figura 3.13.

- Densidad:  $0,8711 \text{ Kg/m}^3$
- Viscosidad dinámica:  $230.1\text{e-}7 \text{ N.s/m}^2$



**Figura 3.13 Cambio de los valores de la viscosidad dinámica y densidad del flujo de aire**

Las propiedades que se asigna se basan a la tabla A4, propiedades termo físicas de gases a presión atmosférica, (p. 839), Incropera, F. & De Witt D. (1996).

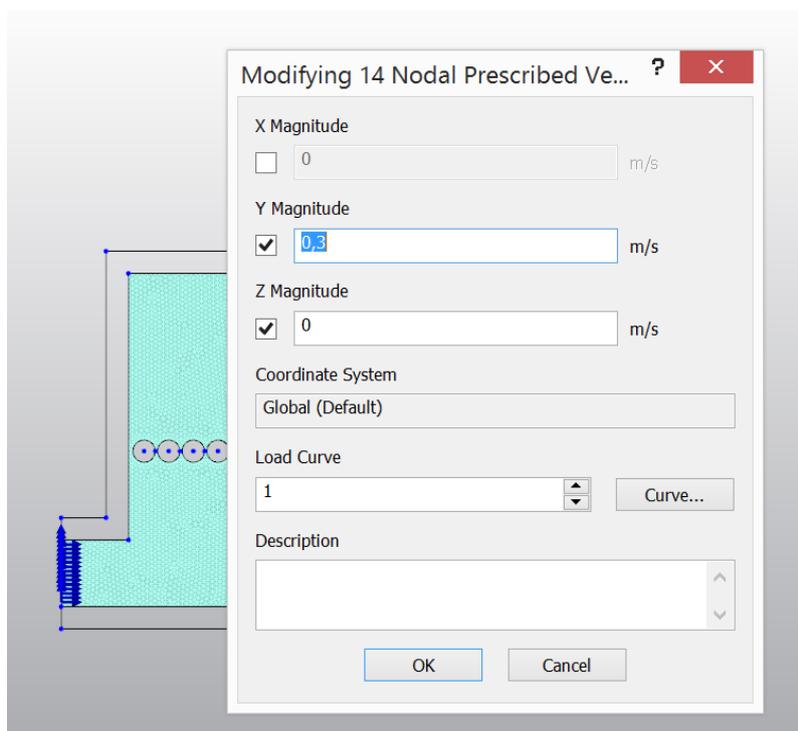
Los valores en la viscosidad y densidad del aire de secado se los mantiene igual para los espesores de 100mm y 150mm.

### 3.3 INGRESO DE PARÁMETROS “MODELO\_SECADOR.FEM” ESCENARIOS DE CONFIGURACIÓN PARA SIMULAR EL CAMBIO DE VELOCIDAD DEL FLUJO DE AIRE DE SECADO

Se selecciona los nodos que conforman el ingreso del flujo de aire a la cámara de secado sin seleccionar los nodos de las esquinas del rectángulo, esto se consigue de la siguiente manera.

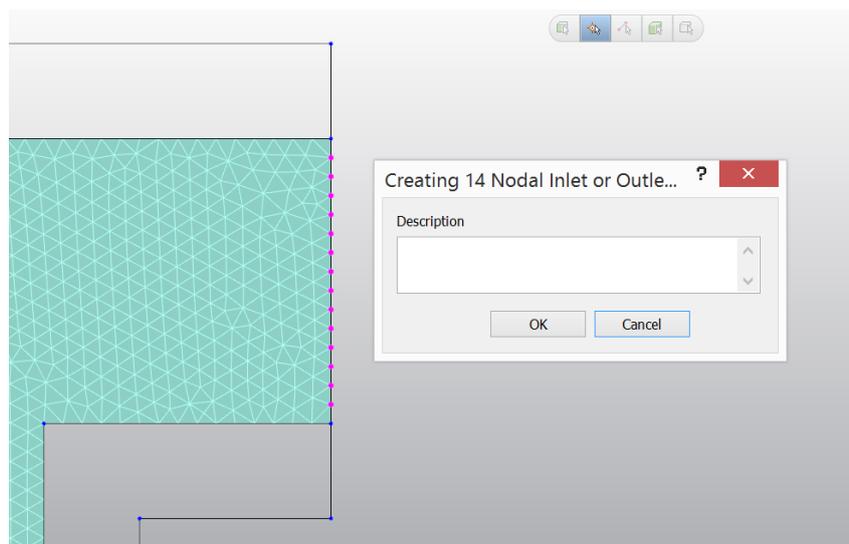
En las pestaña **Selection**> se elige primero el tipo de selección en este caso <**Vertices**> luego en <**Shape**> se elige <**Point or Rectangle**>.

Realizado el paso anterior se selecciona la parte inferior de la cámara sin los nodos de las esquinas y clic derecho para seleccionas la opción <**Nodal prescribed velocities**>, valores que se ingresan tal como se indica en la Figura 3.14, estos mismos pasos se los realiza para los arreglos de secado de 100 y 150mm ya que es esta descripción de pasos se hace referencia para un análisis de un volumen de control con un arreglo de lecho de secado de 50mm.



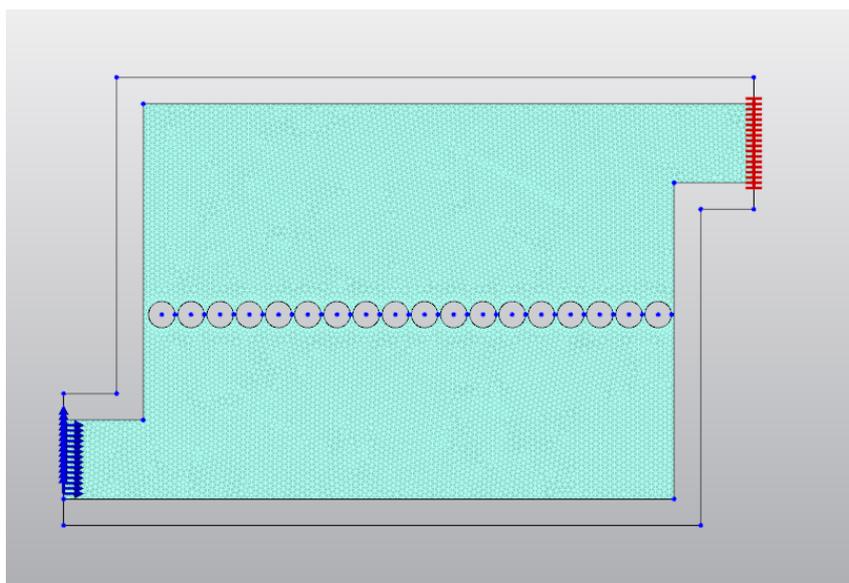
**Figura 3.14 Ingreso de valores para la velocidad del aire de secado**

En la Figura 3.15 se seleccionó la parte superior correspondiente a la salida del aire de secado, esto se realiza de igual forma como se hizo para el ingreso de la velocidad solo que al hacer clic derecho se selecciona <**Nodal prescribed inlet/Outlets**>.



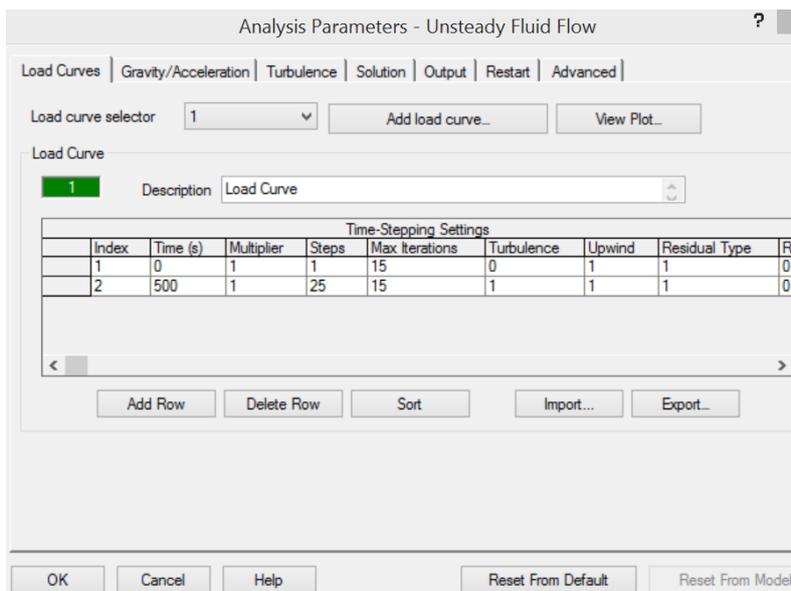
**Figura 3.15 Asignación de la salida del aire de secado**

De acuerdo a la Figura 3.16, ya se tiene definido la salida para el flujo de aire de secado.



**Figura 3.16 Selección para la configuración de parámetros del análisis del primer escenario**

Ahora se ingresa los parámetros del primer escenario de simulación, esto se realiza haciendo clic derecho en el tipo de análisis y se selecciona < *Edit Analysis parameters* >, como se muestra en la Figura 3.17 y se ingresa los valores de 500 segundos para simular el tiempo de secado, se ha tomado 25 pasos de ejecución de todo el proceso de simulación, con un número de 15 iteraciones por cada paso.



**Figura 3.17 Asignación de valores en la tabla de parámetros de análisis del primer escenario**

Como ya se ha configurado lo necesario es elige la pestaña < *Análisis* > y se elige el icono *Run Simulation*>.

### **3.4 CORRIDA DE SIMULACIONES DEL “MODELO\_SECADOR.fem” PRIMER ESCENARIO EN AUTODESK SIMULATION Multiphysics 2013 PARA LOS ESPESORES DE 50, 100 y 150mm DE LECHO DE SECADO A TRES VELOCIDADES 0.3, 0.6 y 1m/s**

Antes de realizar la simulación del escenario uno para las tres velocidades, se tiene en cuenta la cantidad de nodos y elementos que se establece para cada simulación en dependencia del espesor del lecho de secado.

El análisis de cada simulación realizada va en dependencia de lo siguiente:

- Comportamiento de la velocidad del aire de secado al ingreso y salida del secador.
- Comportamiento de la velocidad del aire de secado al estar en contacto con el arreglo del lecho de secado
- Generación de corrientes de aire al interior de la cámara.

La Tabla 3.4 muestra la información necesaria de la cantidad de nodos y elementos involucrados para los tres espesores teniendo en cuenta de que para la simulación respectiva solo se configura la velocidad del aire de secado.

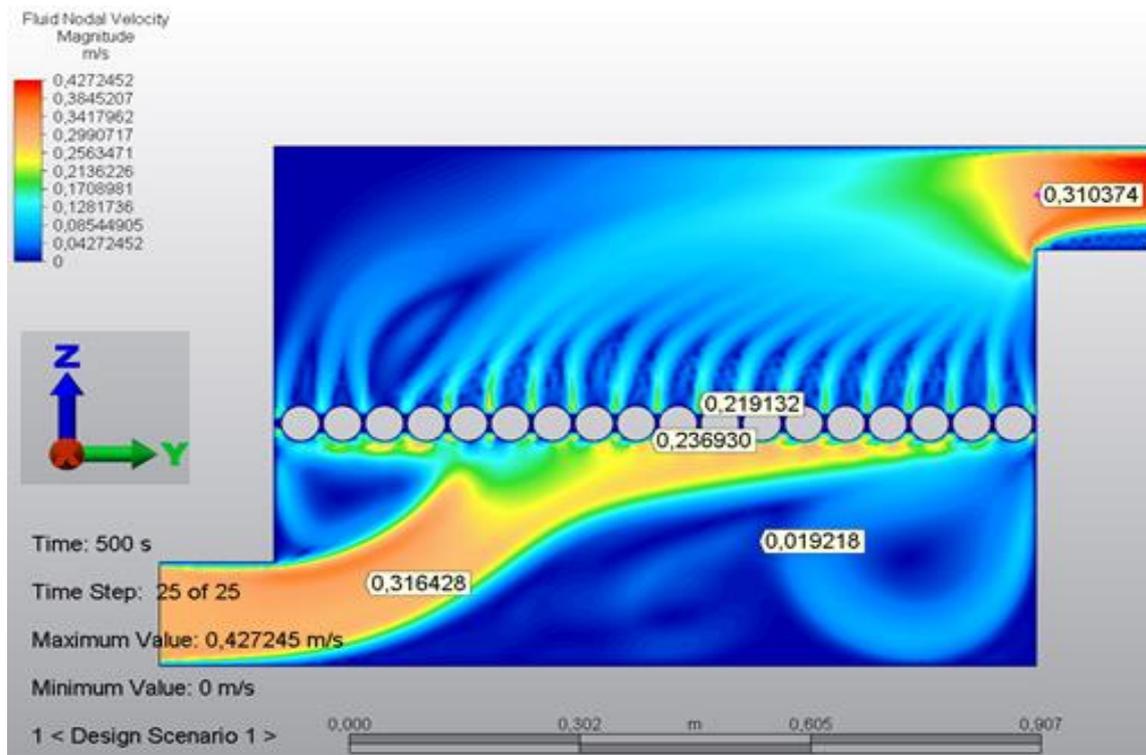
**Tabla 3.4 Detalle del número de nodos y elementos involucrados para las simulaciones de los tres espesores del escenario uno.**

<b>DETALLE DE NODOS Y ELEMENTOS</b>		
<b>ESPESOR (mm)</b>	<b>NODOS</b>	<b>ELEMENTOS</b>
50	9169	17528
100	9213	17219
150	9114	16623

### **3.4.1 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.3m/s con el arreglo de 50mm de lecho de secado**

En esta primer simulación se ha considerado un espesor de 50mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de 0.30m/s, llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.18; Se puede decir que la variación de la velocidad del aire de secado desde la entrada hasta el arreglo del lecho de secado es de un 10% aproximadamente, generando turbulencia bajo los extremos del arreglo, lo que implica que en estos extremos podría haber una rapidez de secado menor.

Para la parte superior de la cámara se nota una retención del aire mínima debido a una velocidad de ingreso y disponibilidad de espacios libres del lecho, por lo que se puede decir que para un lecho de secado de 50.00mm de espesor, la velocidad rompe esta barrera sin dificultad debido a la disponibilidad del lecho y la uniformidad del flujo de aire de secado, logrando obtener una velocidad de salida de la cámara semejante a la de ingreso.

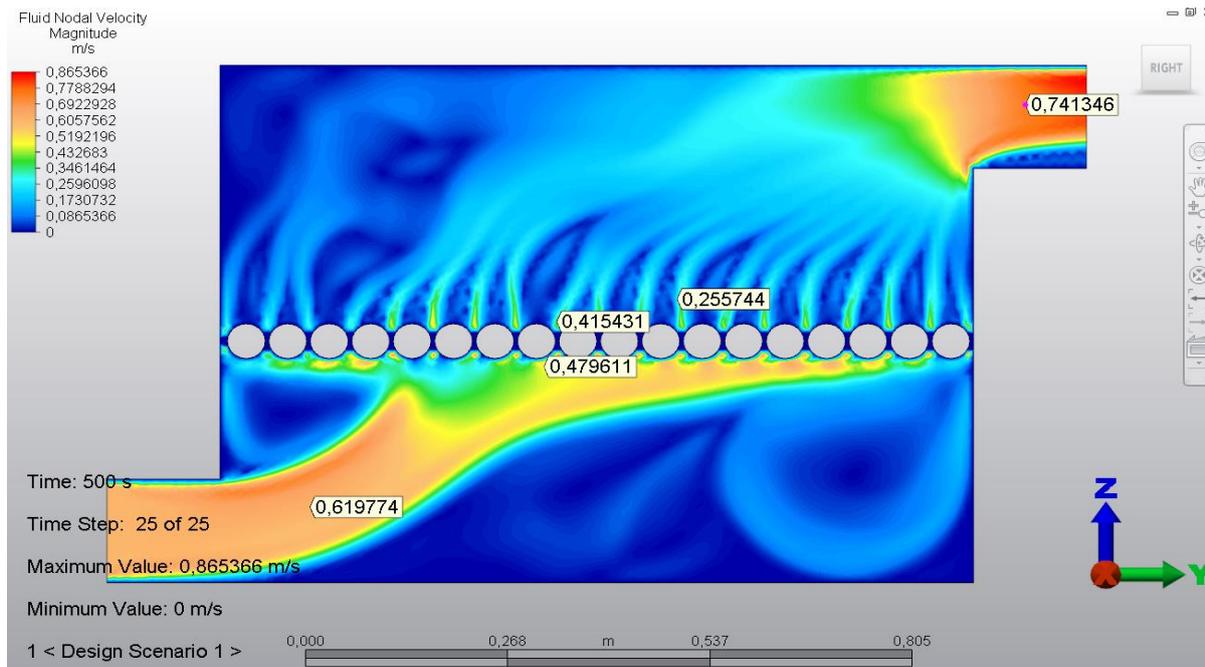


**Figura 3.18 Simulación del escenario uno, a  $v = 0.30\text{m/s}$  y arreglo del lecho = 50mm.**

### **3.4.2 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 0.6m/s con el arreglo de 50mm de lecho de secado**

En esta simulación se ha considerado un espesor de 50mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de 0.60m/s, llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.19; Se puede decir que la variación de la velocidad del aire de secado desde la entrada hasta el arreglo del lecho de secado es de un 22% aproximadamente, generando turbulencia en los extremos con una pérdida de velocidad, provocando retenciones del aire en la parte inferior de la cámara

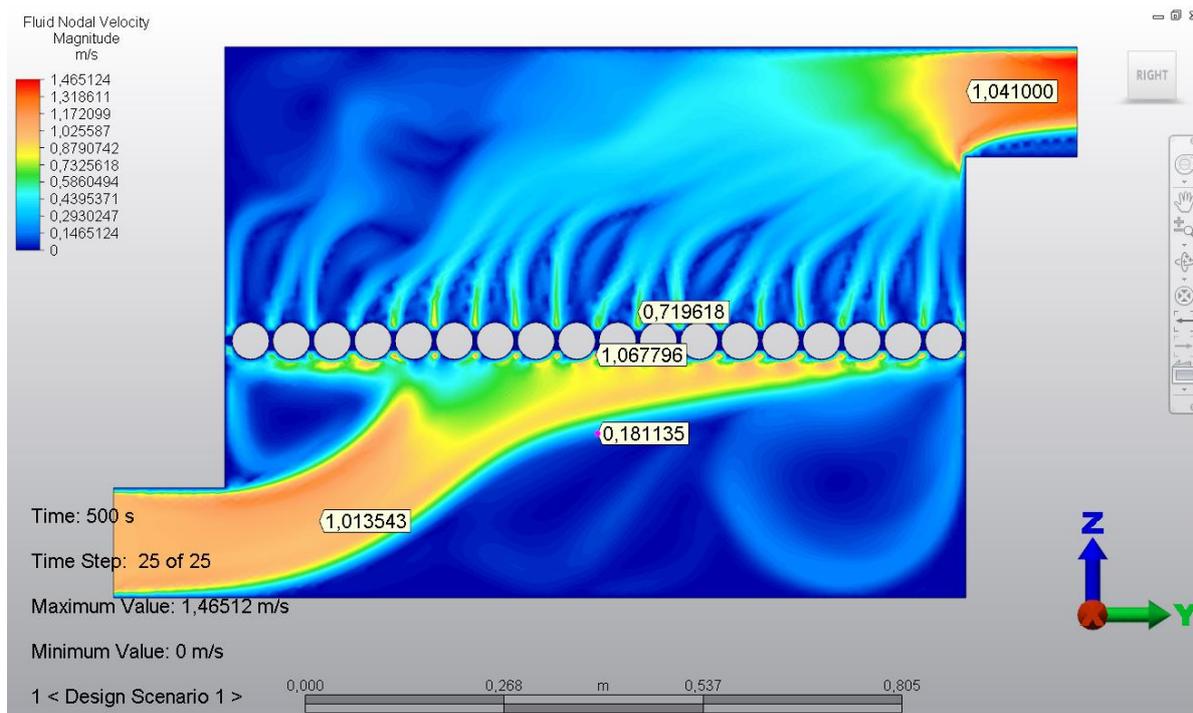
En la parte superior de la cámara se nota la reposición inmediata del flujo de aire total de secado logrando así, un mínimo incremento del 20% aprox. de la velocidad a la salida del volumen de control.



**Figura 3.19 Simulación del escenario uno,  $v = 0.60\text{m/s}$  y arreglo del lecho = 50mm.**

### **3.4.3 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 1.00m/s con el arreglo de 50mm de lecho de secado**

En esta simulación se ha considerado un espesor de 50mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de 1.00m/s, llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.20; Se puede decir que la velocidad del aire de secado desde la entrada hasta el arreglo del lecho de secado muestra valores semejantes en la parte central de contacto con el lecho, mientras que en los extremos se nota una reducción del 50% de la velocidad total, generando corrientes de turbulencia mínima en los extremos de la parte inferior del volumen de control; Para la parte superior del volumen de control pasando el lecho hasta la salida del volumen de control se tiene corrientes uniformes más pronunciadas que en los casos anteriores, demostrando que el arreglo que se tiene no muestra dificultad en retener el aire de secado, dando paso a un estabilización del flujo de aire hasta la salida de la cámara.

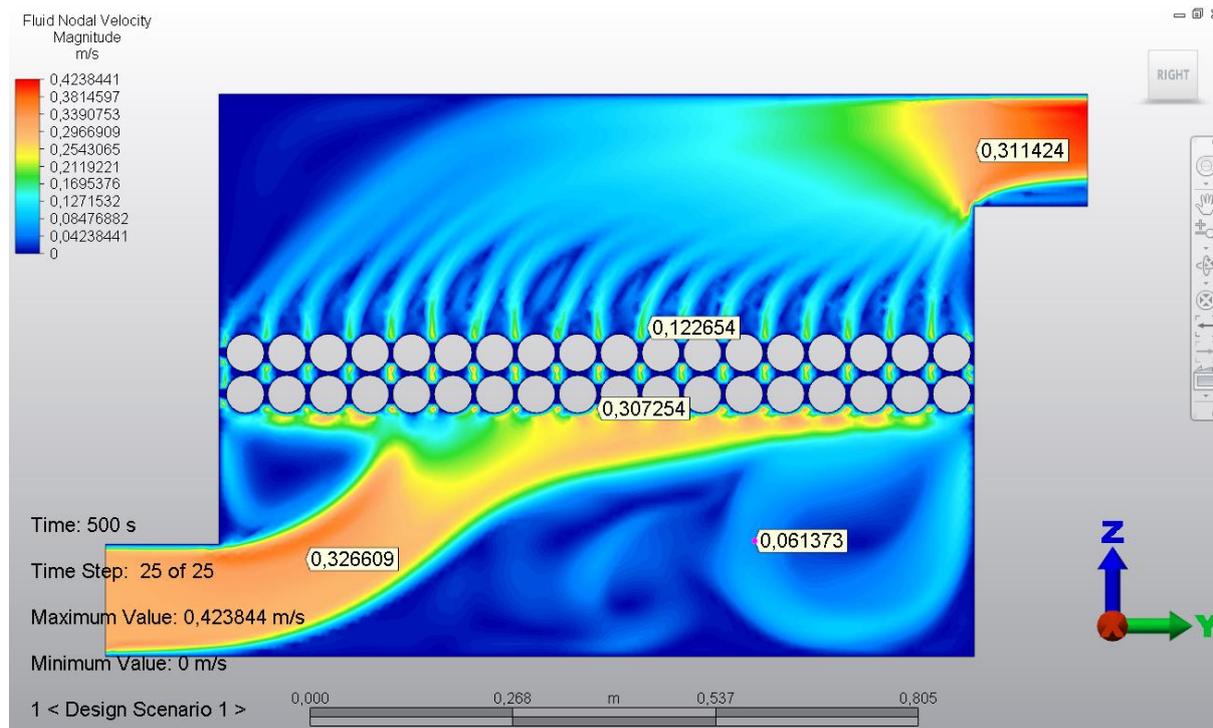


**Figura 3.20 Simulación del escenario uno,  $v = 1.00\text{m/s}$  y arreglo del lecho = 50mm.**

### **3.4.4 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de Secado a $0.30\text{m/s}$ con el arreglo de 100mm de lecho de secado**

En esta simulación se ha considerado un espesor de 100mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de  $0.30\text{m/s}$ , llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.21; Se puede decir que la velocidad del aire de secado desde la entrada hasta el arreglo del lecho de secado tiene valores semejantes en la parte de contacto mientras que en los extremos se nota la presencia de turbulencia, en el extremo opuesto al ingreso de aire se nota una corriente mayor retenida.

Para la parte superior de la cámara desde el lecho de secado se tiene corrientes de aire que tienden a unirse en una sola hasta la salida del volumen de control, dando paso a un aumento mínimo de un 25% aproximadamente de la velocidad del aire de secado.

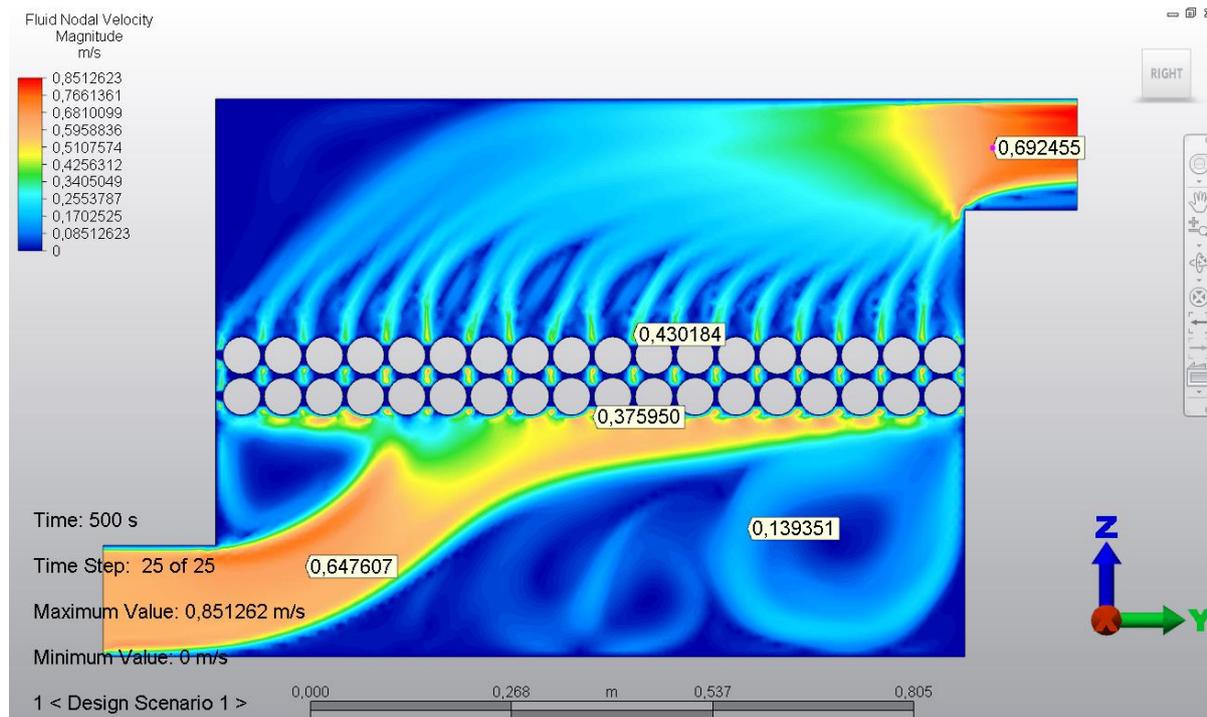


**Figura 3.21 Simulación del escenario uno,  $v = 0.30\text{m/s}$  y arreglo del lecho = 100mm.**

### 3.4.5 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a $0.60\text{m/s}$ con el arreglo de 100mm de lecho de secado

En esta simulación se ha considerado un espesor de 100mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de  $0.60\text{m/s}$ , llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.22; Se puede decir que la velocidad del aire de secado desde la entrada hasta el arreglo del lecho de secado tiende a disminuir en un 38% aproximadamente

Para la parte superior de la cámara desde el lecho de secado se tiene corrientes con velocidad de aire en aumento, mostrando pequeños flujos de aire con velocidades entre  $0.3$  a  $0.5\text{m/s}$ , además se muestra condiciones gráficas que indica no estar reteniendo aire en la parte superior del volumen de control y un aumento de la velocidad producido por la reducción de área a la salida del volumen de control.

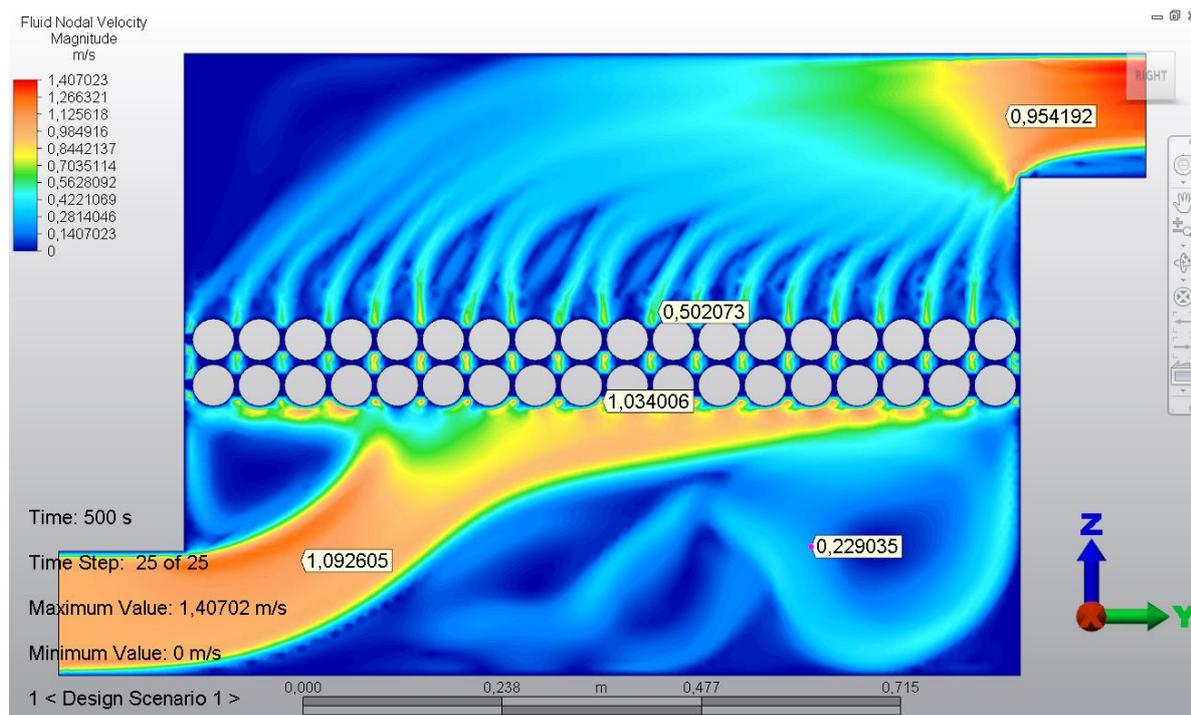


**Figura 3.22 Simulación del escenario uno,  $v = 0.60\text{m/s}$  y arreglo del lecho = 100mm.**

### **3.4.6 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de Secado a 1.00m/s con el arreglo de 100mm de lecho de secado**

En esta simulación se ha considerado un espesor de 100mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de 1.00m/s, llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.23; Se puede decir que la velocidad del aire de secado desde la entrada hasta el arreglo del lecho de secado tiende a mantener valores cercanos de la velocidad del flujo de aire de entrada.

La generación de turbulencia en la parte inferior de la cámara y opuesta al ingreso de aire de secado es mayor que en casos anterior para este mismo lecho de secado; mientras el flujo de aire pasa por el interior del arreglo de secado la velocidad tiende a disminuir y a su vez mostrando corrientes más pronunciadas a la salida del lecho por lo que muestran una reducción de la velocidad total a la salida del volumen de control con valores promedio de 0.95m/s

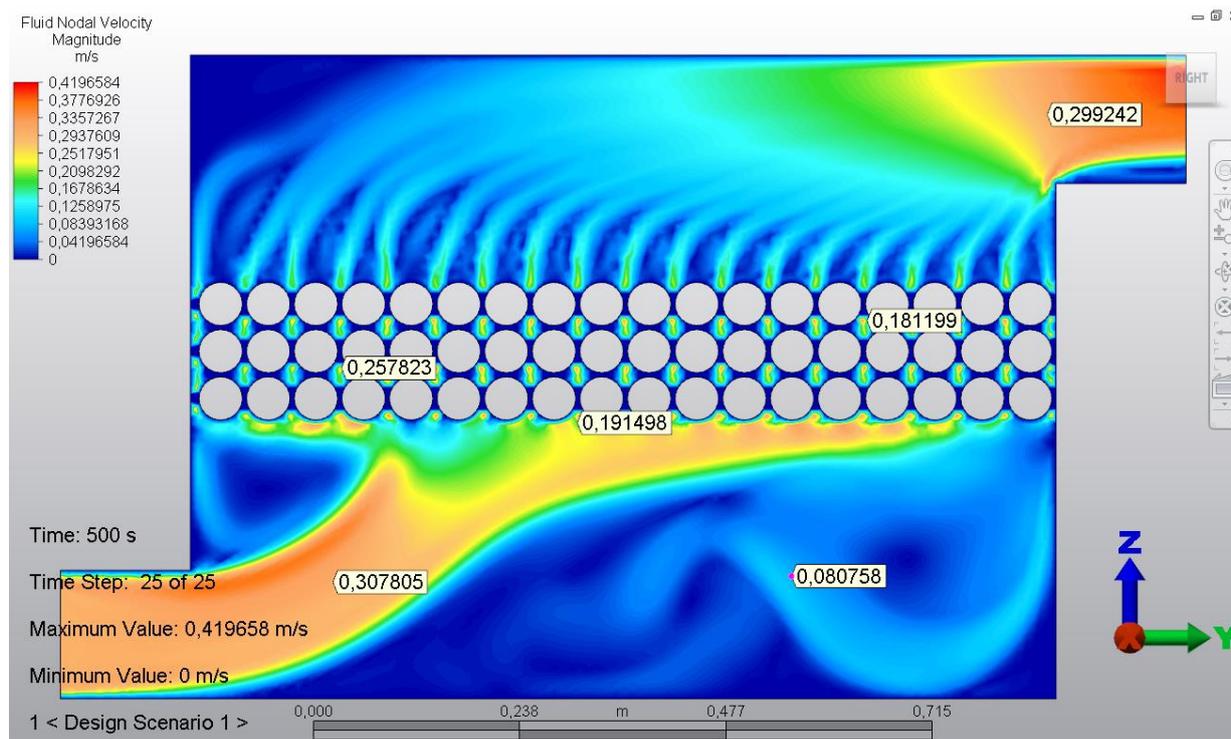


**Figura 3.23 Simulación del escenario uno,  $v = 1.00\text{m/s}$  y arreglo del lecho =  $100\text{mm}$ .**

### **3.4.7 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de Secado a $0.30\text{m/s}$ con el arreglo de $150\text{mm}$ de lecho de secado**

En esta simulación se ha considerado un espesor de  $150\text{mm}$  para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de  $0.30\text{m/s}$ , llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.24; existe la reducción de un  $30\%$  de la velocidad de secado, se muestra evidencias de turbulencia a los extremos, mientras el flujo cruza el lecho la velocidad del aire se logra estabilizarse, mostrando corrientes uniformes de flujo de aire por los espacios libres, logrando una pronta salida del aire con valores de la velocidad semejantes a  $0.30\text{m/s}$ .

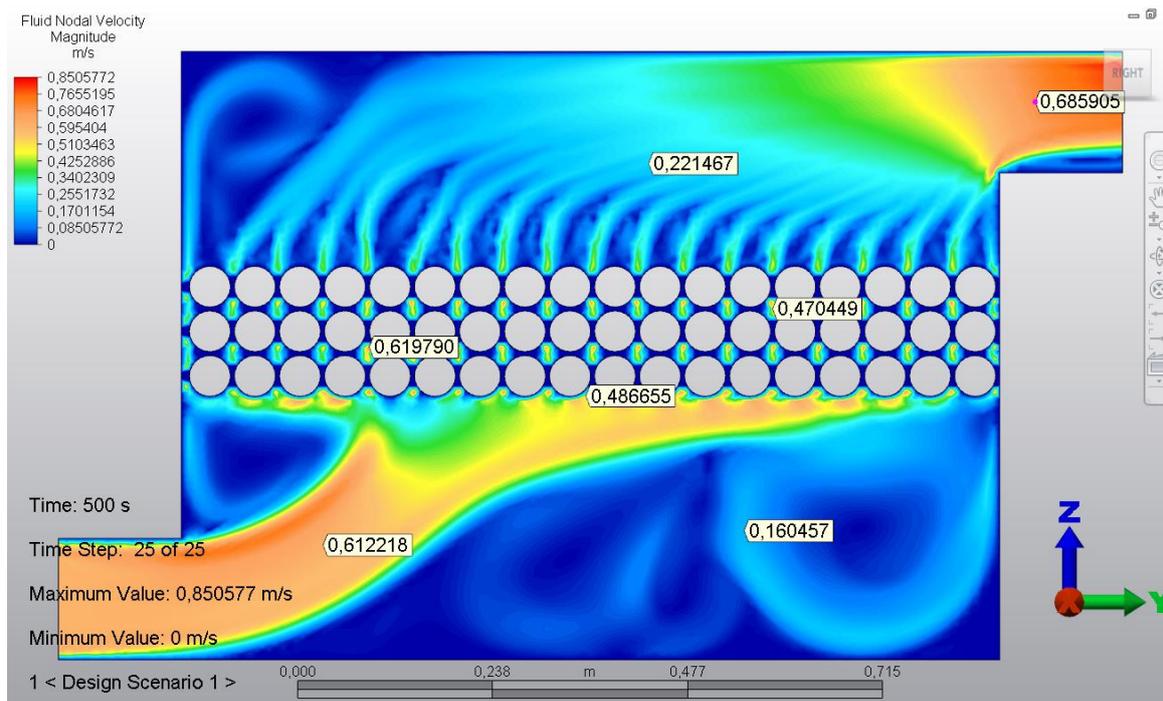
Esto demuestra que mientras se tenga menor espacio de expansión del aire este tiende a salir de un volumen de control con gran facilidad.



**Figura 3.24 Simulación del escenario uno,  $v = 0.30\text{m/s}$  y arreglo del lecho = 100mm.**

### **3.4.8 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de Secado a $0.60\text{m/s}$ con el arreglo de 150mm de lecho de secado**

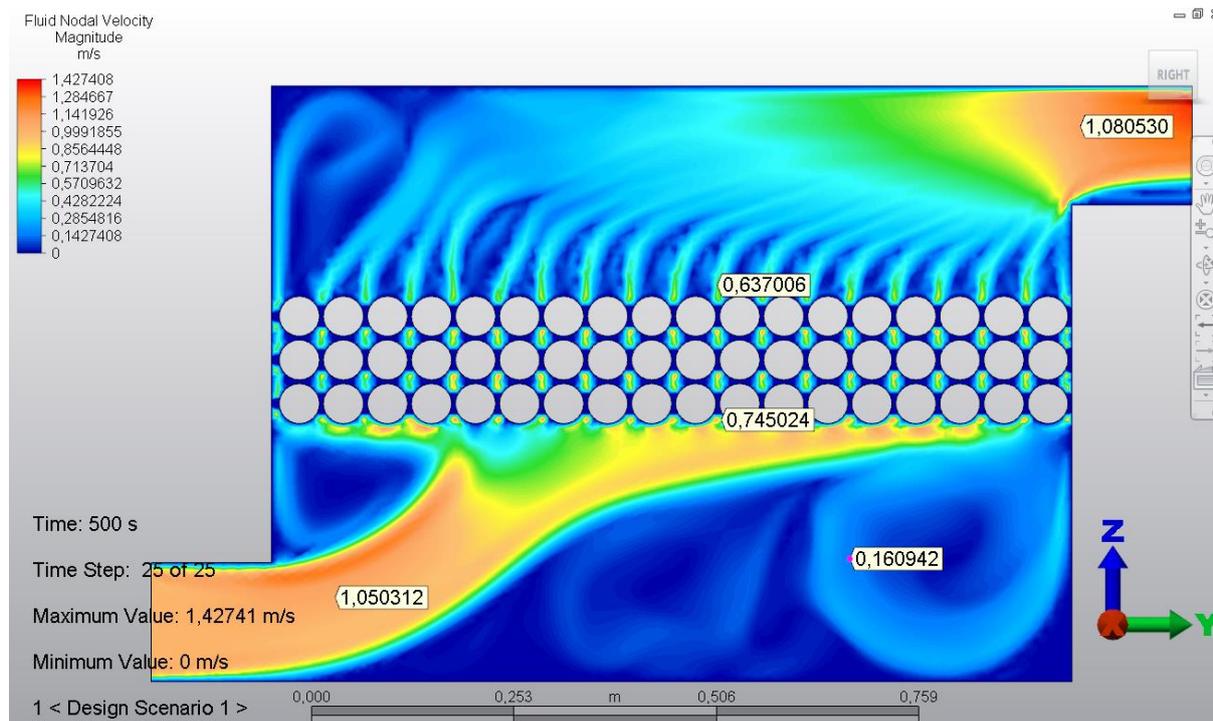
En esta simulación se ha considerado un espesor de 150mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de  $0.60\text{m/s}$ , llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.25; existe la reducción de un 20% de la velocidad de secado, se muestra evidencias de turbulencia a los extremos, mientras el flujo cruza el lecho la velocidad del aire se logra estabilizarse, mostrando corrientes uniformes de flujo de aire por los espacios libres, para este caso se tiene valores que muestran el paso del flujo de aire de secado que generan pequeñas corrientes generadoras de turbulencia en la parte superior del volumen de control.



**Figura 3.25 Simulación del escenario uno,  $v = 0.60\text{m/s}$  y arreglo del lecho = 150mm.**

### **3.4.9 Observaciones del Comportamiento de la Velocidad del Flujo de Aire de secado a 1.00m/s con el arreglo de 150mm de lecho de secado**

En esta simulación se ha considerado un espesor de 150mm para el lecho de secado y una velocidad del aire de secado de 1.00m/s, llegando a conseguir los resultados como se muestra en la Figura 3.26; se puede decir que para el flujo de aire de secado los valores de la velocidad disminuyen de 1.00 a 0.7m/s aproximadamente, con el paso de aire en el interior del lecho de secado se muestra una disminución de la velocidad ya que se tiene una retención del aire en la parte inferior de la cámara, igualmente en la parte superior derecha se tiene turbulencia, en conclusión se tendría un secado no uniforme a estas condiciones.



**Figura 3.26 Simulación del escenario uno,  $v = 1.00\text{m/s}$  y arreglo del lecho =  $150\text{mm}$ .**

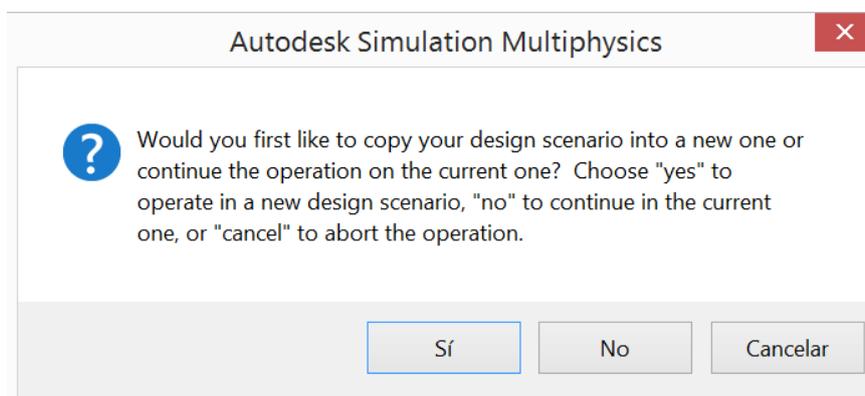
### **3.5 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS Y SIMULACIÓN DEL SEGUNDO ESCENARIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN RÉGIMEN ESTACIONARIO PARA EL MODELAMIENTO DEL SECADOR DE BANDA**

Como ya se tiene las simulaciones de la velocidad de aire para el secado se procede a establecer los parámetros para una segunda simulación complementaria para cada uno de los ensayos según lo establecido en la Tabla 3.1. Lo que se simula en este segundo escenario es el cambio de temperatura por medio de la convección como medio de transferencia de calor, esta información se basa en el archivo de resultados del primer escenario, a continuación se detalla el proceso de configuración del segundo escenario para el “MODELO\_SECADOR.fem”.

1.- como primer paso se procede a crear un nuevo escenario para simular la transferencia de calor en estado estacionario, para ello haciendo clic en < *Analysis Type* > seleccionando la

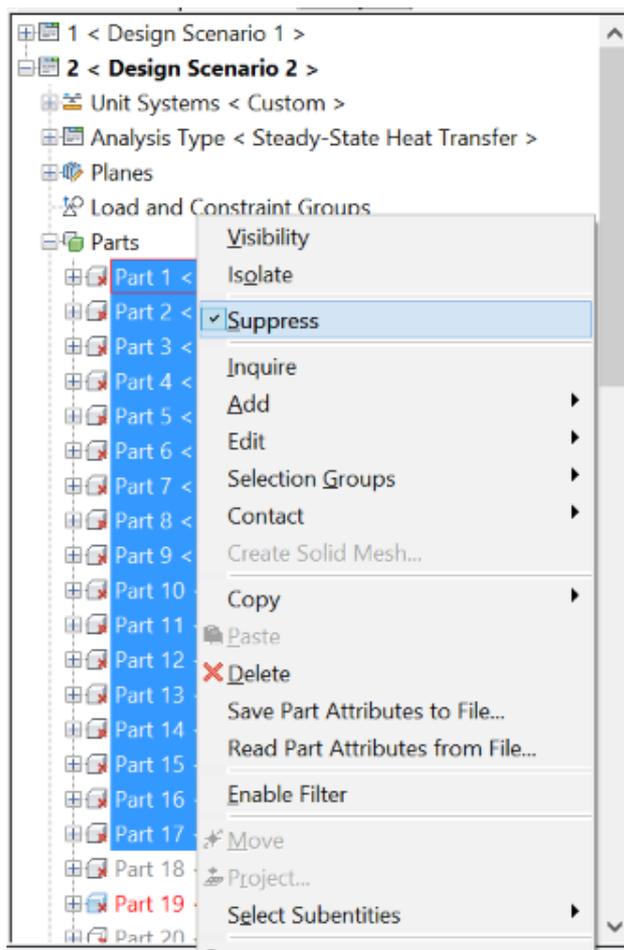
opción < *Set Current Analysis Type* > luego la opción < *Thermal* > y < *Steady State Heat Transfer* > se genera un nuevo escenario.

Como se necesita los elementos del escenario uno se elige “Sí” en la Figura 3.27.



**Figura 3.27 Ventana de opciones para generar o abortar un escenario de simulación en Autodesk Simulation Multiphysics 2013**

2.- Ya generado el escenario dos, se procede a habilitar las partes desactivadas en el escenario uno con la finalidad de configurar parámetros y asignación de cargas al escenario dos, tal como se indica en la Figura 3.28.



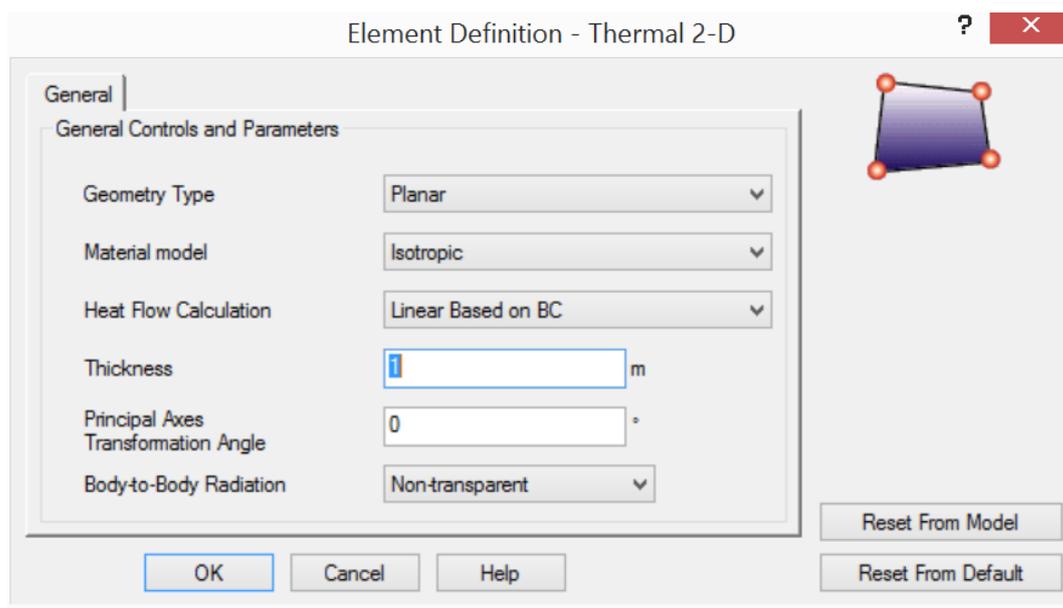
**Figura 3.28** Activación de partes desactivadas en el escenario uno para la configuración parámetros al lecho de secado

3.- Con un clic sin soltar de derecha a izquierda en el árbol de partes del modelo se selecciona las partes necesarias y con un clic derecho se elige la opción < **Suppress** > para involucrar a estas partes en el escenario dos tal como se indica en la Figura 3.29, así mismo como se tiene seleccionado las partes se elige la opción < **Visibility** >.

4.- Como ya se tiene todos los elementos que conforman el lecho de secado del modelo se procede a ingresar los parámetros de acuerdo a lo siguiente:

- En < **Element Type** > se elige la opción < **2-D** >

- Para la definición del elemento se configura los parámetros de acuerdo a lo indicado a continuación en la ventana de definición de elementos de la Figura 3.29:



**Figura 3.29 Configuración de parámetros para la definición del elemento para el lecho de secado en el segundo escenario**

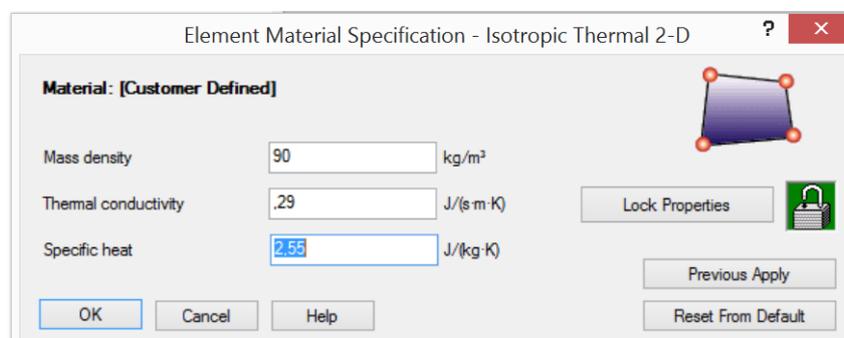
Las especificaciones del material se asignan de acuerdo a los siguientes valores:

Densidad de Masa: 90 Kg/m<sup>3</sup>

Conductividad Térmica: 0.29 J/(s.m.K)

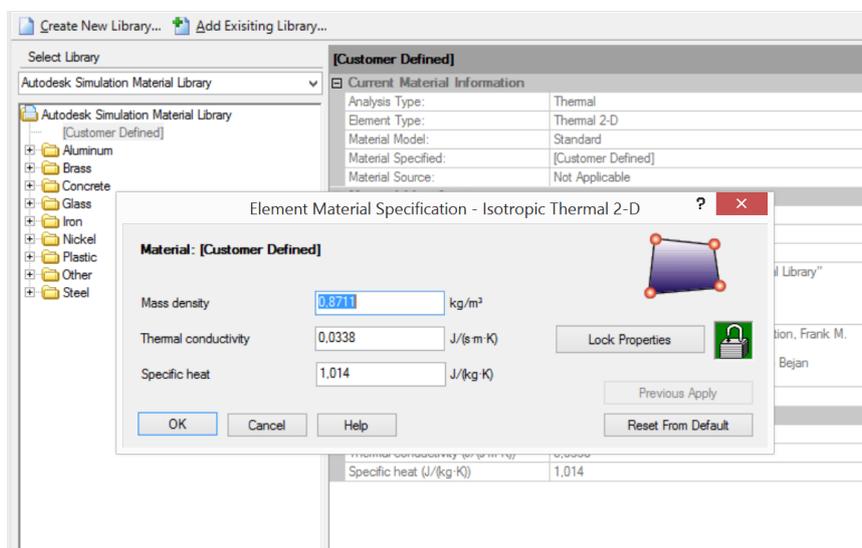
Calor específico: 2.55 J/(Kg.K)

Los Valores indicados como parámetros de configuración para el lecho de secado, se los muestra en la Figura 3.30.



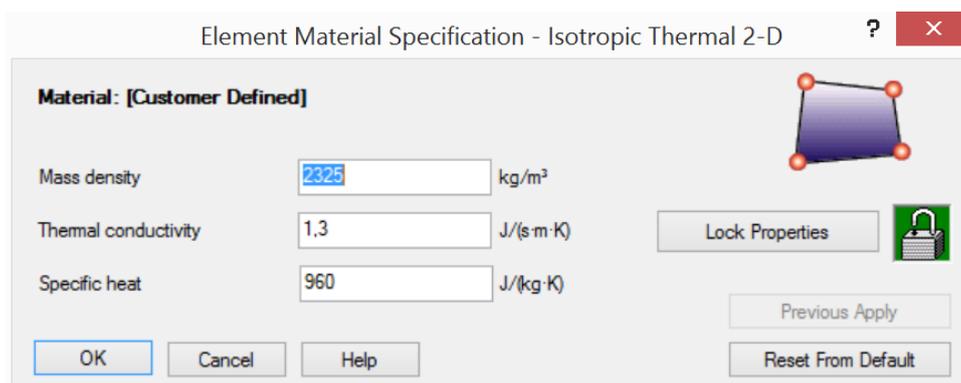
**Figura 3.30 Configuración de parámetros para especificar el material representativo del lecho de secado**

Las condiciones del aire que hay que modificar en este escenario son las que definen el aire con el cual se extraerá el agua del lecho de secado, valores que se ingresa en la ventana que aparece en la Figura 3.31.



**Figura 3.31 Configuración de parámetros para especificar las condiciones del aire de secado para el régimen estacionario de transferencia de calor**

5.- Las propiedades para el aislante de la cámara han sido ingresadas en la ventana de especificaciones de la materia tal como se muestra en la Figura 3.32.

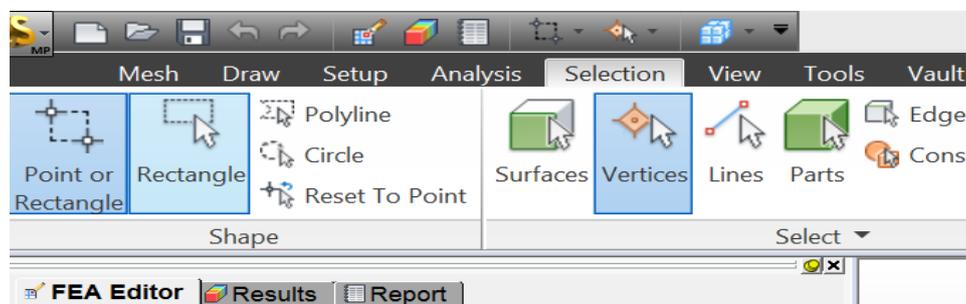


**Figura 3.32 Configuración de parámetros para especificar las condiciones de los elementos que conforman el aislante de la cámara de secado**

6.- Asignación de cargas para el escenario dos de transferencia de calor por convección.

Como primera carga se asigna la temperatura a la cual se desarrolla el secado, esto se lo realiza conforme los siguientes pasos que se detallan a continuación:

En la pestaña < *Selection* > se elige < *Point or Rectangle* > y en < *Select* > la opción < *Vertices* >, con la finalidad de seleccionar la superficie donde se aplica la carga de temperatura controlada, tal como se puede ver en la Figura 3.33.

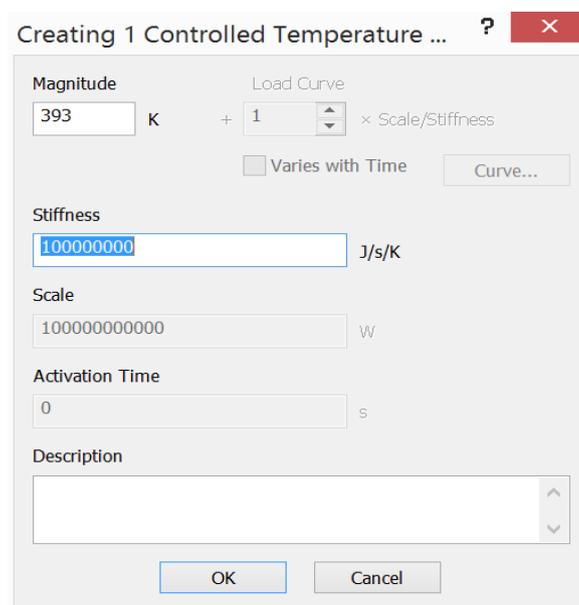


**Figura 3.33 Selección de Opciones para seleccionar superficies y asignar cargas al modelo**

Para la asignación de la superficie controlada por temperatura, se selecciona los nodos de la entrada de aire de la cámara de secado.

Se hace clic derecho para elegir la opción < *Add* > y superficie controlada por la temperatura.

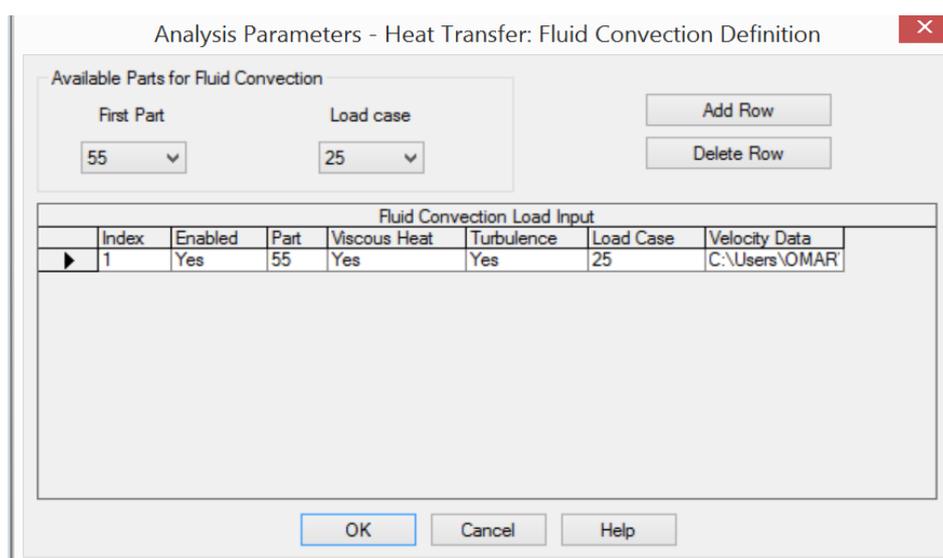
Los valores que asignan son los que se muestran en la Figura 3.34:



**Figura 3.34 Configuración de la superficie controlada por temperatura**

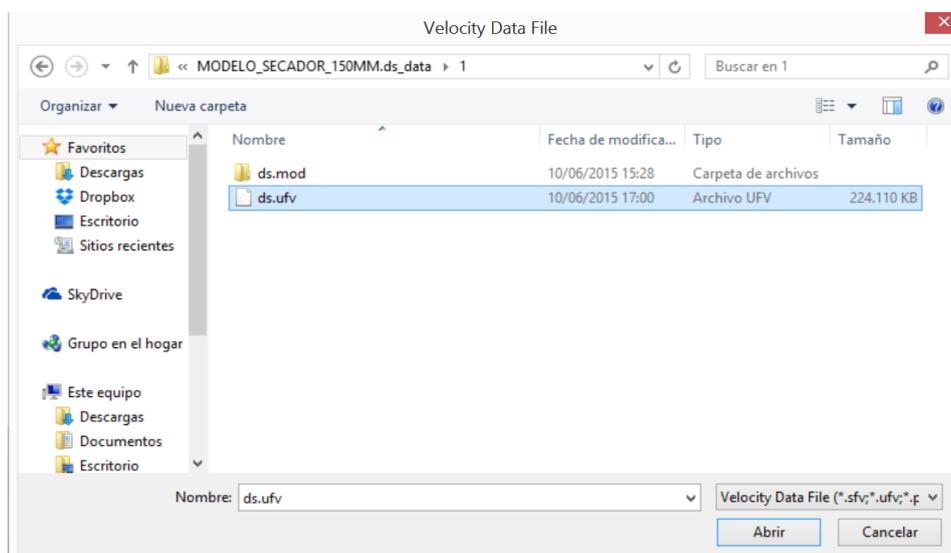
7.- Ahora ya asignado la temperatura para la superficie seleccionada se enlaza los dos escenarios de simulación con la finalidad de completar el proceso de secado mediante la transferencia de calor por convección.

A continuación se configura los parámetros necesarios relacionados con la importación de resultados del escenario uno de simulación, como se visualiza en la Figura 3.35.



**Figura 3.35 Configuración de la carga de flujo convectivo**

En la Figura 3.36 se muestra la información necesaria a configurar para enlazar los dos escenarios para el proceso de secado.

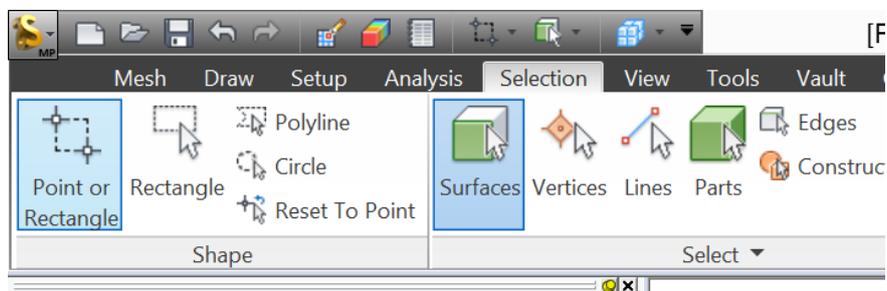


**Figura 3.36 Importación del archivo del escenario uno**

8.- Como ya se tiene asignado una temperatura para el secado, el archivo de resultados del primer análisis de velocidades del aire se procede a indicar el medio de transferencia de calor, en este caso es la convección y para ello se asigna de un coeficiente de convección forzada.

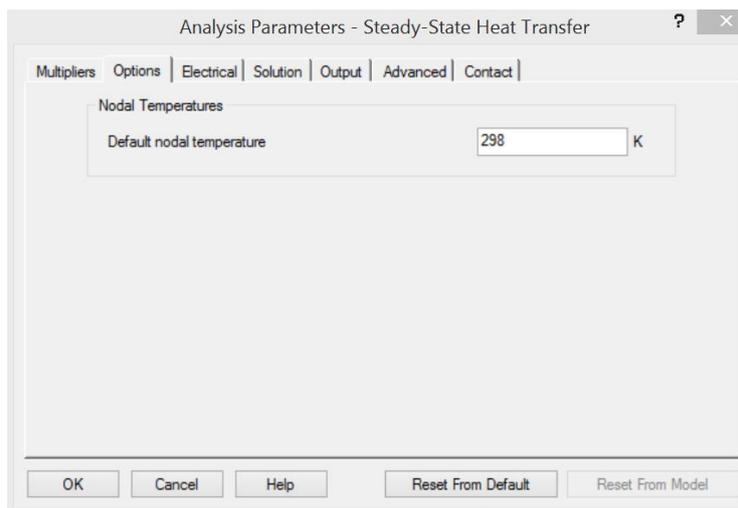
De acuerdo a la Figura 3.37 se ha tomado la siguiente secuencia de pasos:

En < **Selection** > se elige < **Point or Rectangle** > y en < **Select** > la opción < **Surfaces** >, se hace clic en el mallado interno de la cámara, luego clic derecho y se elige < **Add** >, < **Surface Convection** >.



**Figura 3.37** Selecciones dadas para una superficie

9.- Como último paso se configura los parámetros de análisis, esto se lo realiza haciendo clic derecho en el escenario, de la misma manera como se hizo en el primer escenario, en < **Options** > se configura la Temperatura de los nodos del modelo; En la Figura 3.38 se muestra el último procedimiento realizado para culminar con el proceso de la integración de la velocidad de aire para la transferencia de calor por medio de la convección. Los mismos procedimientos realizados detallados anteriormente para la configuración del escenario dos con el lecho de secado de 50mm se los realiza con el resto de ensayos de la Tabla 3.1, como ya se tiene configurado el escenario por completo se procede a la respectiva simulación.



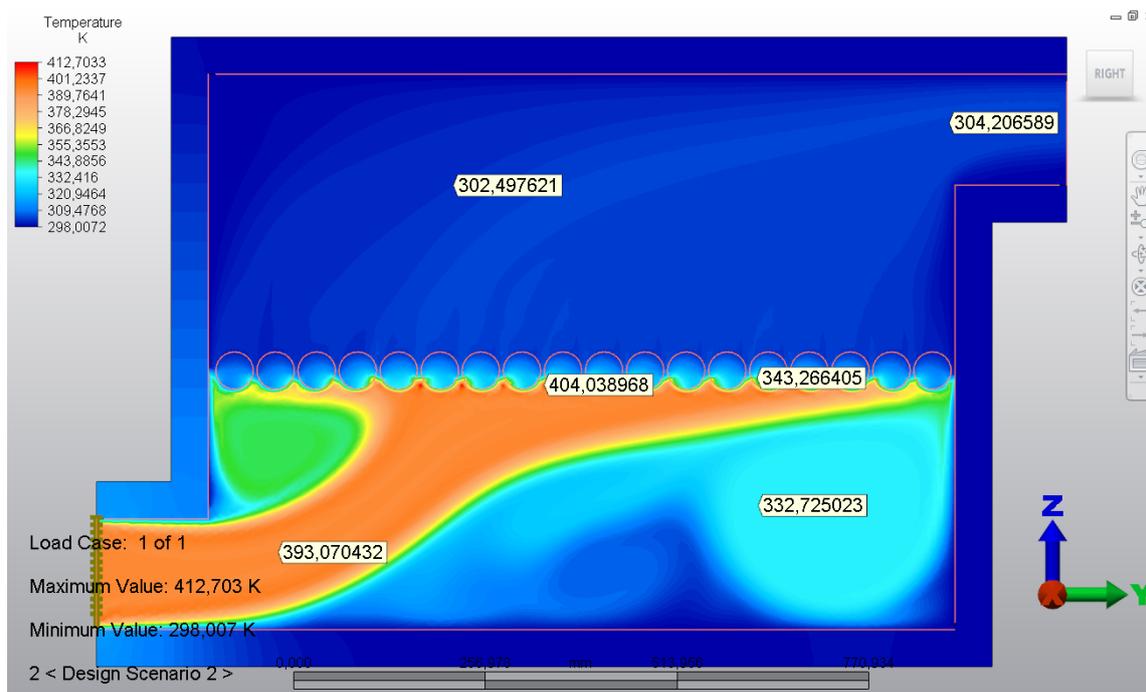
**Figura 3.38 Asignación de la temperatura nodal inicial para el modelo en el escenario dos**

### **3.5.1 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 50mm de lecho de secado y 0.30m/s de velocidad de secado.**

De acuerdo a la Figura 3.39 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 50mm a una velocidad del flujo de aire de 0.30m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente;

Como se puede observar el cambio de la temperatura desde el valor inicial de 393.00K hasta que el flujo de aire entra en contacto con el lecho de secado, muestra un valor de la temperatura de 404.00K aproximadamente, indicando que debido al lecho de secado se tiene una retención del aire y por lo tanto se produce un aumento en la temperatura.

Luego de que el aire de secado traspasa el lecho de secado la temperatura tiende a disminuir a valores promedios de 304.00K mostrando así el enfriamiento del aire.



**Figura 3.39 Resultado final del escenario dos para un lecho de 50mm y 0.30m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

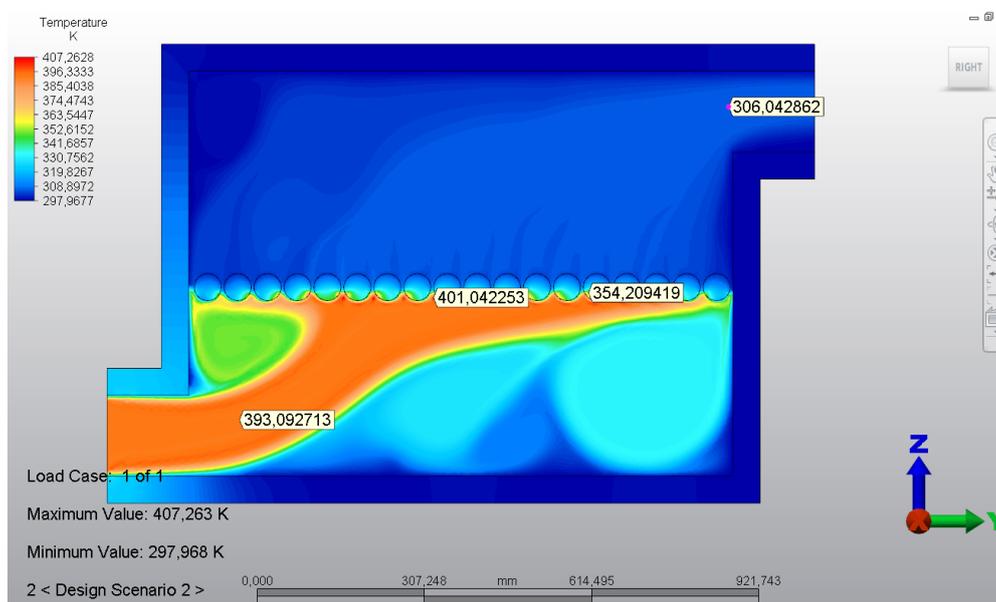
### **3.5.2 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 50mm de lecho de secado y 0.60m/s de velocidad de secado.**

De acuerdo a la Figura 3.40 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 50mm a una velocidad del flujo de aire de 0.60m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente;

Como se puede observar el cambio de la temperatura desde el valor inicial de 393.00K hasta que el flujo de aire entra en contacto con el lecho de secado, muestra un valor de la temperatura de 401.00K aproximadamente.

Se puede notar el cambio de la temperatura a lo ancho del volumen de control, en los extremos la temperatura tiende a disminuir a valores de 350.00K.

Luego de que el aire de secado traspasa el lecho de secado la temperatura tiende a disminuir a valores promedio de 306.00K mostrando así la temperatura del aire con la que sale del volumen de control.

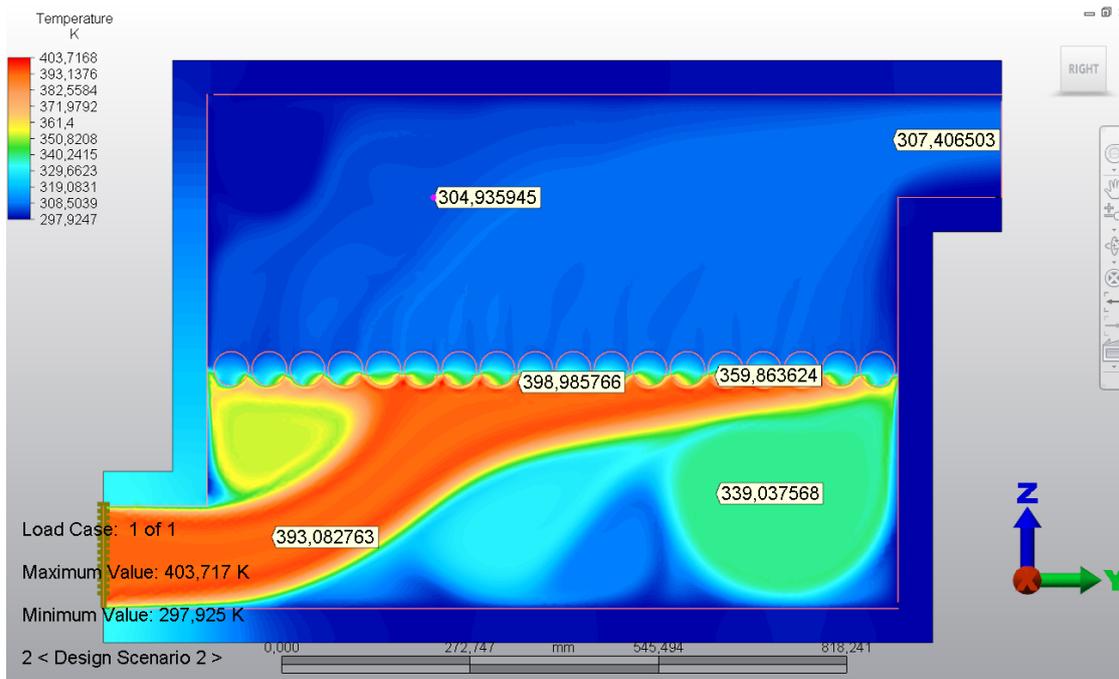


**Figura 3.40 Resultado final del escenario dos para un lecho de 50mm y 0.60m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

### 3.5.3 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 50mm de lecho de secado y 1.00m/s de velocidad de secado.

De acuerdo a la Figura 3.41 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 50mm a una velocidad del flujo de aire de 1.00m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente; la distribución de calor en la parte inferior de la cámara es irregular ya que se tiene una gran cantidad de valores de temperatura que oscilan entre 393.00 y 360.00K, esto debido a la cantidad de aire retenida en los costados de la cámara bajo el lecho de secado.

Para este ensayo se tiene además que la distribución de la temperatura en la parte superior del volumen de control se mantiene uniforme con valores de 304.00K aproximadamente.



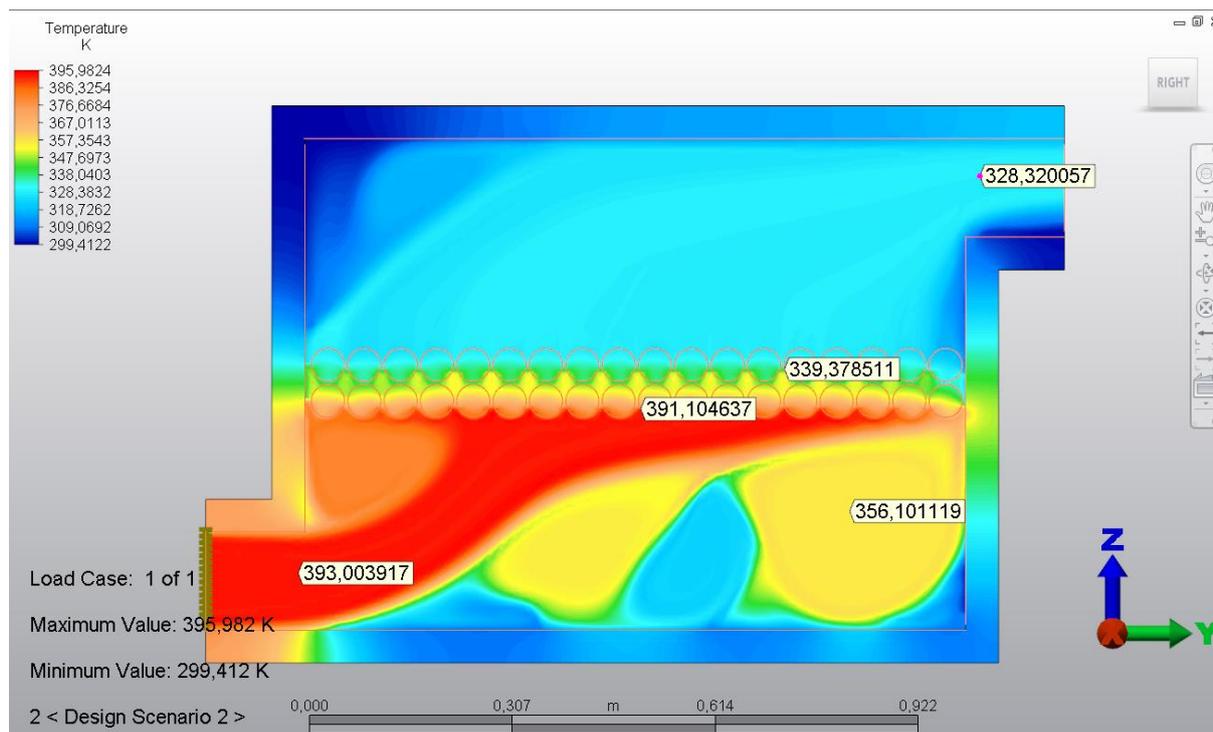
**Figura 3.41 Resultado final del escenario dos para un lecho de 50mm y 1.00m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

### **3.5.4 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 100mm de lecho de secado y 0.30m/s de velocidad de secado.**

De acuerdo a la Figura 3.42 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 100mm a una velocidad del flujo de aire de 0.30m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente;

Con respecto a la parte inferior del volumen de control se tiene temperaturas con valores entre 356.00K y 393.00 K lo que indica que existe una gran cantidad de aire retenido.

En este caso de igual forma se observa la disminución de la temperatura en la parte superior de la cámara que a su vez es uniforme con una temperatura promedio de 328.00K.



**Figura 3.42 Resultado final del escenario dos para un lecho de 100mm y 0.30m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

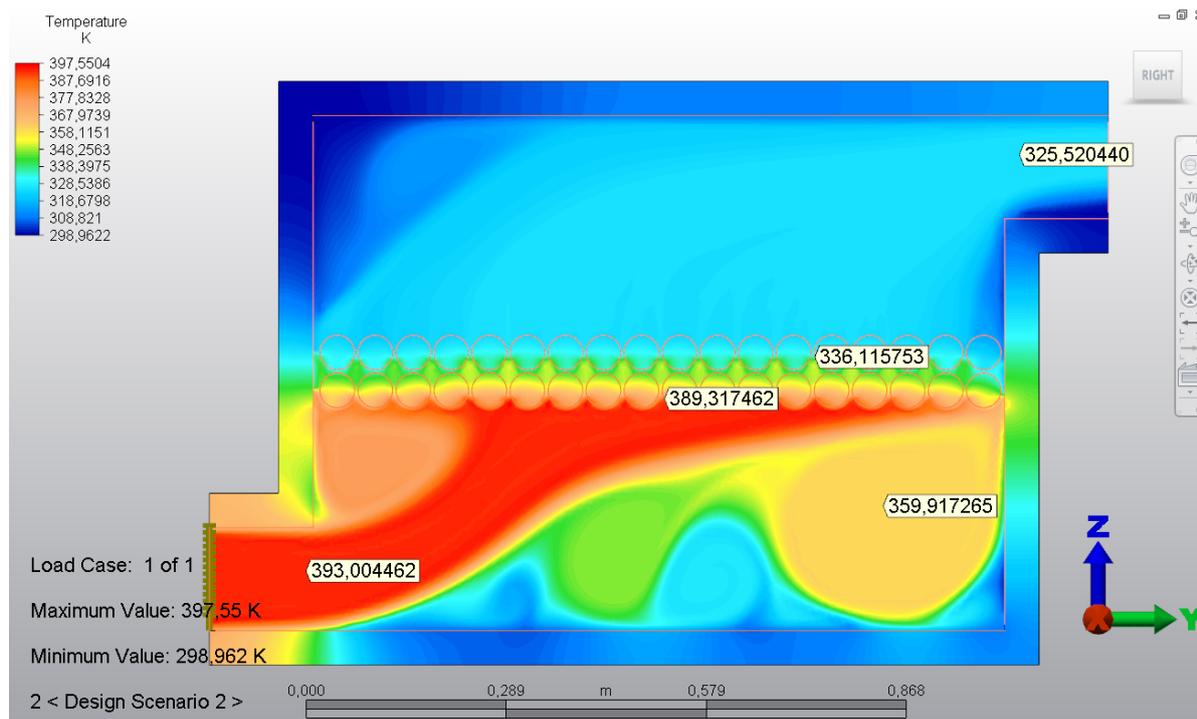
### **3.5.5 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 100mm de lecho de secado y 0.60m/s de velocidad de secado.**

De acuerdo a la Figura 3.43 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 100mm a una velocidad del flujo de aire de 0.60m/s,

De acuerdo a los resultados de esta simulación para la parte inferior de la cámara de secado, se tiene valores de la temperatura del aire de secado entre 360.00K y 393.00K, debido a la generación de turbulencia.

Mientras el flujo de aire de secado cruza el arreglo dispuesto para el arreglo de 100.00mm la temperatura tiende a disminuir desde 390.00K a 336,00K,

El aire sale del volumen de control con un valor promedio de 325.00K mostrando una reducción moderada de la temperatura.

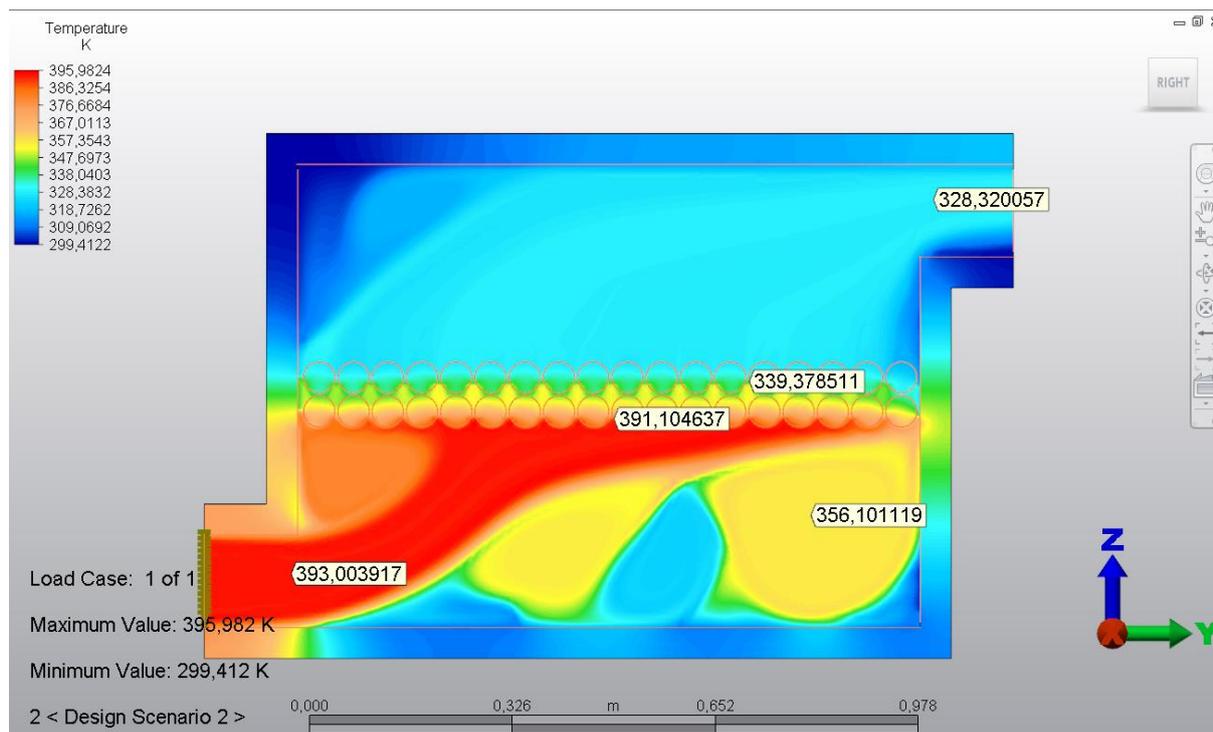


**Figura 3.43 Resultado final del escenario dos para un lecho de 100mm y 0.60m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

### **3.5.6 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 100mm de lecho de secado y 1.00m/s de velocidad de secado.**

De acuerdo a la Figura 3.44 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 100mm a una velocidad del flujo de aire de 1.00m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente:

En la parte baja del lecho de secado de 100mm se tiene una corriente de aire a una temperatura de 396.00K aproximadamente la cual conforme cruza en arreglo va disminuyendo el valor de la temperatura hasta estabilizarse en la parte superior de la cámara con una temperatura de 328,00K.



**Figura 3.44 Resultado final del escenario dos para un lecho de 100mm y 1.00m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

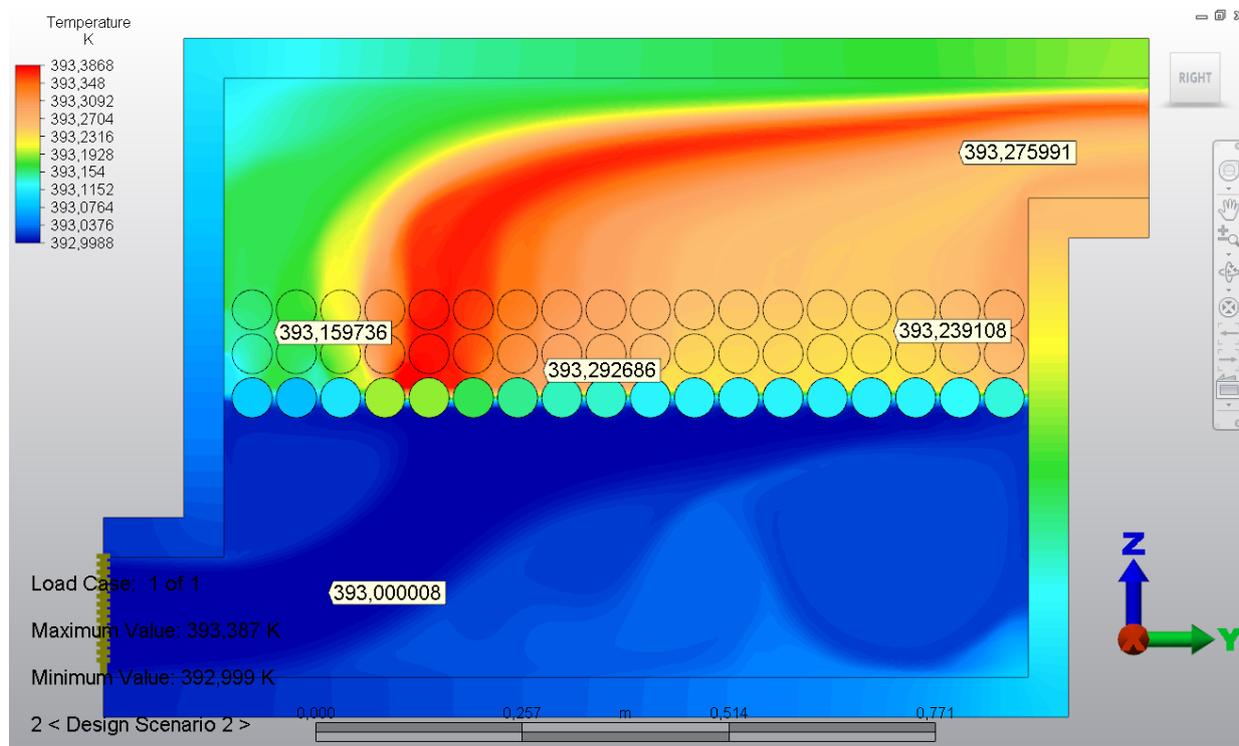
### **3.5.7 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 150mm de lecho de secado y 0.30m/s de velocidad de secado.**

De acuerdo a la Figura 3.45 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 150mm a una velocidad del flujo de aire de 0.300m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente;

Considerando primeramente la parte inferior de la cámara se tiene una distribución uniforme de la temperatura a condiciones iniciales para el secado de 393,00K.

El cruce del flujo de aire en el lecho de 150mm es irregular ya que existe corrientes de aire con valores promedio de temperatura semejantes a de la temperatura inicial, se considera para este caso que no sería aconsejable emplear este tipo de secado ya que el aire de secado se retiene en la parte inferior de la cámara de secado.

La temperatura en la parte superior de la cámara continúa con valores semejantes a una temperatura de 393.00K, no logrando un proceso de secado adecuado para este caso.



**Figura 3.45 Resultado final del escenario dos para un lecho de 150mm y 0.30m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

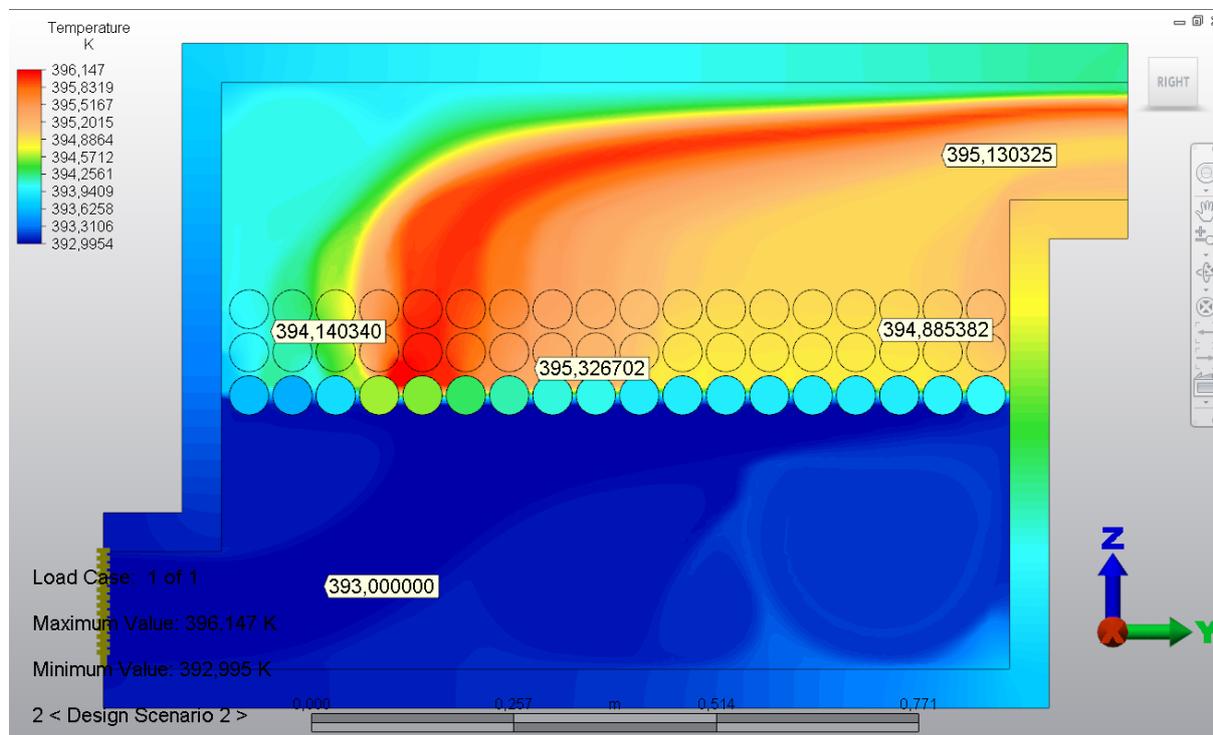
### 3.5.8 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 150mm de lecho de secado y 0.60m/s de velocidad de secado.

De acuerdo a la figura 3.46 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 150mm a una velocidad del flujo de aire de 0.60m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente:

El flujo de aire de secado se encierra en la parte inferior del volumen de control, manteniendo una misma temperatura de 393,00K.

Conforme el flujo avanza por el lecho de secado, se tiene aumentos de la temperatura mínimos los cuales no son adecuados, para un secado a estas condiciones.

El aire de secado sale de la cámara con valores de temperatura de 395.00K, situación que no es aceptable ya que no se desarrolla un proceso de secado adecuado.

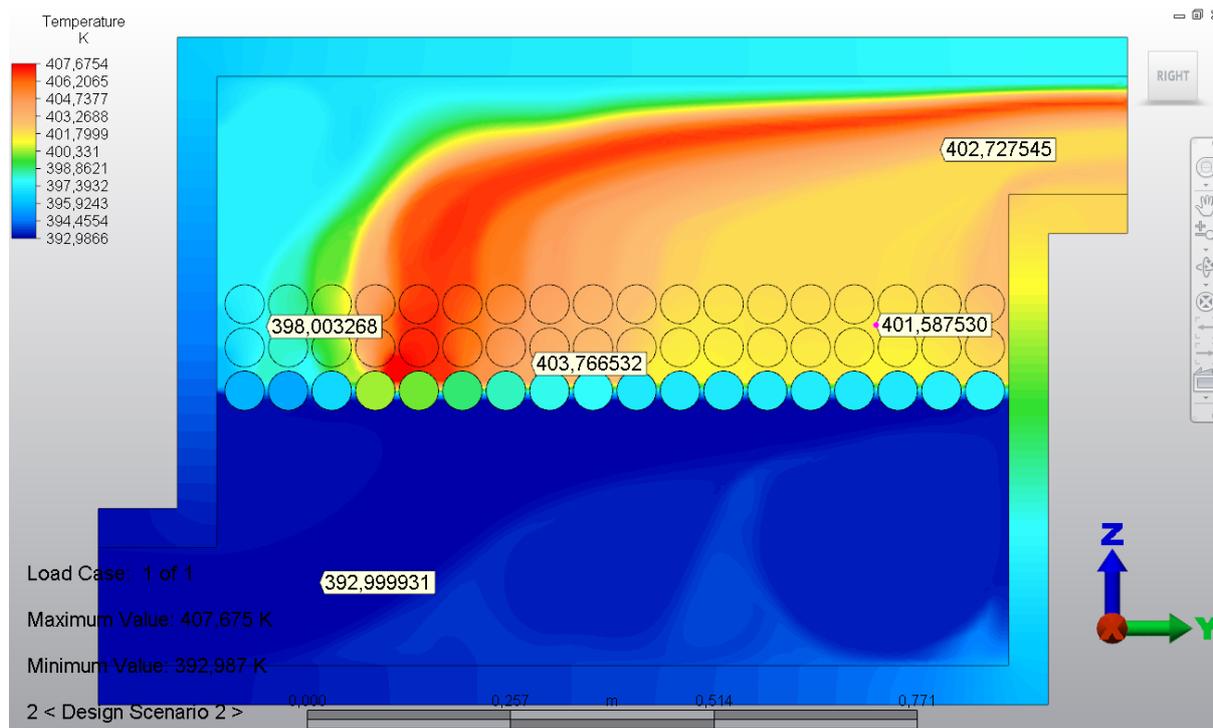


**Figura 3.46 Resultado final del escenario dos para un lecho de 150mm y 0.60m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

### **3.5.9 Observaciones del Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para un espesor de 150mm de lecho de secado y 1.00m/s de velocidad de secado.**

De acuerdo a la Figura 3.47 se puede ver el resultado final de la simulación, el calor aplicado en teoría es extraído por el arreglo que representa el lecho de secado de 150mm a una velocidad del flujo de aire de 1.00m/s, para este caso se dice que el cambio de temperaturas al interior del volumen de control sucede lo siguiente;

A breves observaciones para este caso de simulación como en casos similares con el arreglo de 150mm no es útil para poner en práctica debido a que la temperatura de secado va en aumento, logrando así sobrepasar las condiciones a las que debía realizarse el secado.



**Figura 3.47 Resultado final del escenario dos para un lecho de 150mm y 1.00m/s de velocidad en régimen estacionario de transferencia de calor**

### **3.5.10 Consideraciones para el cálculo de energía total basado en el Comportamiento de Régimen Estacionario de Transferencia de calor del “MODELO\_SECADOR.fem” para los arreglos propuestos del lecho de secado de alfalfa de 50, 100 y 150mm.**

Todo esto se realiza con la finalidad de mostrar la cantidad total de energía necesaria para el secado de los tres arreglos dados para los lechos de secado de 50, 100 y 150mm bajo las condiciones del aire de secado a tres velocidades de 0.3, 0.6 y 1.0m/s, se realiza un proceso de cálculos con la finalidad de elegir las mejores condiciones de secado de acuerdo a lo que se tiene en consideración en la tabla 1.10 del capítulo 1.

A continuación se muestra las ecuaciones involucradas para calcular la cantidad neta de energía requerida para el secado

Para el análisis de energía total del volumen de control propuesto en la figura 3.3, se tiene;

La energía del fluido en movimiento por unidad de masa está dada por la siguiente ecuación:

$$\theta = P.v + e = P.v + (u + ec + ep) \quad (3.1)$$

Donde,

$$h = P.v + u \quad (3.2)$$

$\theta$ : Energía del fluido en movimiento, dada en  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

$h$ : Entalpia, dada en  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

$P.v$ : Energía de flujo, dada en  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

$u$ : Calor latente, dado en  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

$ec$ : Energía cinética, dada en  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

$ep$ : Energia potencial, dada en  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

Tomando en cuenta de que la energía cinética y energía potencial son nulas debido a su bajo valor que aportan en este tipo de análisis se tiene:

$$\theta = P.v + u$$

Donde,

Para obtener la cantidad de energía se emplea la siguiente ecuación:

$$E_{aire} = m_{aire} \cdot \theta \quad (3.3)$$

Donde,

$E_{aire}$ : La tasa de energía requerida para el secado, dada en  $KW$ .

$m_{aire}$ : Cantidad de masa de aire por unidad de tiempo, dada en  $(\frac{Kg}{s})$ .

Puesto que

Con el uso de la ecuación 3.3 y la tabla del anexo B, se podrá hacer un análisis para poder encontrar un comportamiento aceptable para los ensayos simulados en Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

Ahora, tomando en cuenta las dimensiones del arreglo del lecho de 50mm se tiene;

$$V_{T1} = 0.759m^3$$

Donde;

$V_{T1}$ : Volumen total de un arreglo representativo de un lecho de alfalfa 50mm.

Tomando en cuenta la densidad de la alfalfa se obtiene la masa de alfalfa,

$$\rho = m/V_{T1}$$

$$m = 67.5Kg$$

Mientras que para los arreglos de 100 y 150 mm, los valores del contenido de masa de alfalfa son 135.00 y 200.50 Kg, respectivamente.

La cantidad de agua a extraer de los 67.5Kg de alfalfa, usando los valores para la cantidad de agua contenida en 1.0Kg de alfalfa según se indica en la Tabla 1.11, se tiene; 51.59 Kg de agua son necesarios extraer con el flujo de aire caliente en 500 segundos; En la tabla 3.5 se muestra la cantidad de agua necesaria a extraer durante el proceso de secado de alfalfa para tres arreglos de lecho de secado.

**Tabla 3.5 Contenido de Agua a Extraer por Arreglo**

ARREGLO (mm)	Contenido de Agua (Kg)
50,00	51,59
100,00	103,18
150,00	154,77

Se procede a calcular la cantidad de energía requerida para la deshidratación de alfalfa del arreglo del lecho de 50mm y una velocidad de 0.30m/s.

En este caso la energía por unidad de masa corresponde al valor de la entalpía que se obtiene del Anexo B, para una temperatura del aire de secado de salida de 343.00K aproximadamente corresponde un valor de:

$$h = 2556.00 \left( \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$\theta = h$$

$$\theta = 2627.00 \frac{KJ}{Kg}$$

$$E_{aire} = m_{aire} \cdot \theta$$

$$E_{aire} = \frac{51.59Kg}{500s} \cdot 2627.00KJ/Kg$$

$$E_{aire} = 271.05KW$$

Con la finalidad de respaldar los ensayos realizados y definir el comportamiento para la deshidratación de alfalfa se muestra en la Tabla 3.6, valores a los que se hace referencia al lecho de secado, tales como: Temperatura, entalpía y cantidad de energía requerida para el calentamiento del aire de secado de cada uno de los lechos de alfalfa con sus respectivas combinaciones de velocidad de flujo de aire.

**Tabla 3.6 Resultados obtenidos de las simulaciones realizadas**

Arreglo de Lecho ( mm)	Velocidad (m/s)	Temperatura del lecho de Secado (K)	Entalpía (KJ/Kg)	Tasa de Energía del lecho de Secado (KW)
50	0,30	343,27	2627	271,05
50	0,60	354,21	2644	272,81
50	1,00	359,86	2660	274,46
100	0,30	339,38	2627	542,11
100	0,60	336,11	2610	538,60
100	1,00	339,38	2627	542,11
150	0,30	393,23	2706	837,62
150	0,60	394,88	2706	837,62
150	1,00	401,58	2721	842,26

De acuerdo a los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas de las observaciones del comportamiento de la deshidratación de alfalfa se considera realizar el respectivo análisis para establecer las mejores condiciones de secado basado en el uso de Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

## **CAPÍTULO IV**

### **EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DE SIMUACIÓN PARA EL PROCESO DEL SECADOR DE BANDA PARA LA DESHIDRATACION DE ALFAFA**

La evaluación de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas se analiza con la finalidad de mostrar un comportamiento adecuado del proceso de deshidratación de alfalfa para un secador de banda transportadora.

#### **4.1 ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS DEL PRIMER ESCENARIO DE SIMULACIÓN**

El análisis del comportamiento de la velocidad del aire de secado en el interior del volumen de control se ha hecho en consideración a las observaciones realizadas para el flujo del aire de secado a tres velocidades 0.3, 0.6 y 1.0m/s, combinando con los arreglos de 50, 100 y 150mm de espesor del lecho de secado de alfalfa.

Se considera los siguientes aspectos de análisis en referencia a:

- Cambio de la velocidad del flujo de aire con respecto al ingreso y salida del volumen de control.
- Comportamiento de la velocidad al estar en contacto con el arreglo del lecho de secado.
- Generación de turbulencias en la parte inferior de la cámara.

De acuerdo a la información de la Tabla 4.1 se tiene que la variación de la velocidad inicial es relativamente igual para los tres espesores, mostrando características similares con la velocidad del flujo de aire.

Se tiene que de acuerdo se varia el espesor a una misma velocidad la reducción de esta es semejante debido a que se tiene gran facilidad de paso por ser un lecho moderado.

**Tabla 4.1 Valores de la Velocidad a la Salida del Volumen de Control**

Lecho (mm)	50	100	150
Vin(m/s)	Vf(m/s)		
0,3	0,38	0,38	0,37
0,6	0,77	0,76	0,77
1	1,31	1,26	1,28

Donde,

VI: Velocidad inicial (m/s).

Vf: Velocidad a la salida del volumen de control (m/s).

De acuerdo a la Tabla 4.2 se tiene que para la velocidad con la que ingresa el flujo de aire de secado lo siguiente:

Con respecto al cambio mostrado de la velocidad inicial de 0.30m/s para un lecho de secado de 50mm se tiene una mínima reducción de la está en un 12%, conforme aumenta el valor de la velocidad a 0.60m/s la velocidad disminuye en un 42% de su total, al tener el valor de 1.00m/s la velocidad con la que sale el aire de secado del arreglo disminuye en un 11%; por consiguiente se tiene que en este caso la velocidad de 1.00m/s consigue las mejores condiciones para este espesor.

Haciendo la misma comparación de velocidades como el anterior caso, pero ahora para un espesor de 100mm, tomando en cuenta los valores en el orden de 0.3, 0.6 y 1.00m/s se consigue reducciones de velocidad de 36%, 33% y 23% respectivamente, por lo que en este caso el valor más adecuado para la velocidad es de 1.00m/s.

Ahora como ultima comparación de velocidades en contacto con el lecho de secado de 150mm se tiene así mismo en el orden para valores iniciales de velocidad de flujo de 0.3, 0.6 y 1.00m/s se tienen velocidades en reducción del 37%, 21% y 32% respectivamente; dando como valor óptimo para este espesor la velocidad inicial de 0.6m/s.

**Tabla 4.2 Comportamiento de la Velocidad al Contacto con el Lecho de Secado**

Lecho (mm)	50		100		150	
VI	V <sub>in</sub>	V <sub>s</sub>	V <sub>in</sub>	V <sub>s</sub>	V <sub>in</sub>	V <sub>s</sub>
0,3	0,237	0,219	0,307	0,122	0,19	0,18
0,6	0,479	0,219	0,376	0,43	0,48	0,47
1	1,06	0,72	1,034	0,502	0,745	0,637

Donde;

VI: Velocidad inicial (m/s).

V<sub>in</sub>: velocidad ingreso al lecho (m/s).

V<sub>s</sub>: Velocidad a la salida del Lecho (m/s).

Se considera para la velocidad del flujo de aire de secado con respecto a la generación de turbulencias en la parte inferior de la cámara que, conforme se aumenta el valor de la velocidad de flujo de aire para los valores de 0.3, 0.6 y 1.0m/s y tomando en cuenta la dependencia al paso de flujo de los espesores de 100 y 150mm; es útil mantener un espesor de 100mm de acuerdo a lo observado en los resultados es mejor tener este espesor debido al paso moderado que puede tener el aire al estar en contacto con el producto en condiciones reales de secado.

## 4.2 ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS DEL SEGUNDO ESCENARIO DE SIMULACIÓN

Para este análisis de transferencia de calor se considera análisis similares a los que se hizo para los resultados del primer escenario, siendo los siguientes:

- Cambio de la temperatura del flujo de aire con respecto al ingreso y salida del volumen de control.
- Comportamiento de la temperatura al estar en contacto con el arreglo del lecho de secado.
- Generación de turbulencias en la parte inferior de la cámara.

Se realiza el análisis de transferencia de calor en este caso tomando en cuenta el efecto que tiene el cambio de temperatura al interior del volumen de control, de acuerdo a la combinación de los tres espesores de 50, 100 y 150mm con las tres velocidades de 0.3, 0.6 y 1.0m/s, todo esto con la finalidad de acercarse a la obtención de un comportamiento de secado con las mejores condiciones obtenidas de este análisis.

A continuación se muestra la Tabla 4.3 en la que se da a conocer los cambios de temperatura que se tiene para los tres lechos de 50, 100 y 150mm, manteniendo constantes las velocidades de 0.3, 0.6 y 1.00 del flujo de aire;

**Tabla 4.3 Cambio de la temperatura ensayos de secado.**

Lecho (mm)	50		100		150	
VI(m/s)	T <sub>in</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>in</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>in</sub>	T <sub>s</sub>
0,3	393	304	393	328	393	393
0,6	393	306	393	325	393	395
1	393	307	393	328	393	402

Donde,

$T_{in}$ : Temperatura inicial del volumen de control

$T_s$ : Temperatura final del volumen de control.

De acuerdo a lo que se muestra en la Tabla 4.3 se puede notar que el cambio de temperatura en referencia a los lechos de 50 y 100mm va en reducción alrededor de 100 y 60 grados mientras que para el lecho de secado de 150mm el valor de la temperatura en toda la cámara no varía su valor inicial de 393K, concluyendo de que el cambio de la temperatura es aceptable para los espesores de 50 y 100mm, por lo que se tiene condiciones de secado similares a las que rige el comportamiento un comportamiento de secado aceptable.

Para el lecho de secado de 150mm se puede decir que el cambio de temperatura en el interior de la cámara de secado permanece constante con un valor de 393,00K por lo que no es recomendable hacer uso de este proceso de secado.

Los valores que se tiene en la Tabla 4.4 muestran las condiciones de la temperatura en el lecho de secado.

Como en el caso anterior de análisis de temperatura se tiene en este caso la temperatura con la que ingresa el flujo de aire de secado al lecho y la temperatura con la que sale del mismo, considerando valores enteros para este análisis.

De acuerdo a la variación de la temperatura del flujo de aire al ingreso y salida de los lechos de secado de 50, 100mm se tiene disminuciones de 100, 60 grados respectivamente, mientras que para el lecho de 150mm la temperatura se mantiene a un valor aproximado de 393K. Por lo que se puede decir que los lechos de secado son aceptables en este caso de 50 y 100mm debido a su variación de temperatura moderada dentro del rango aproximado para el secado.

**Tabla 4.4 Condiciones de Temperatura del Lecho de Secado.**

Lecho (mm)	50		100		150	
VI(m/s)	T1	T2	T1	T2	T1	T2
0,3	404	302	391	328	393	393
0,6	401	306	389	325	393	395
1	398	304	391	328	393	400

Donde,

T1: Temperatura de la parte inferior del lecho de secado (K).

T2: Temperatura de la parte superior del lecho de secado (K)

Como última consideración para el análisis de temperatura en el interior del volumen de control con respecto a la generación de turbulencias se tiene que:

Para un lecho de secado de 50mm las corrientes de flujo turbulento son moderadas debido a que están a temperaturas promedio de 335K valores adecuados para el aire al interior de la parte inferior de la cámara.

Para los lechos de secado de 100 y 150mm de espesor hay valores promedio de temperatura entre 360.00K y 390.00K respectivamente en la parte inferior de la cámara de secado.

Para el lecho de secado de 150mm se tiene retenciones del flujo de aire y por lo que existe un calentamiento en la parte inferior del volumen de control, y no es posible el proceso de secado.

### **4.3 Análisis de la cantidad de Energía requerida para el secado de alfalfa de los lechos de secado de 50, 100 y 150mm de espesor.**

De acuerdo a los análisis realizados de velocidad del flujo de aire de secado y comportamiento de la temperatura se procede a realizar un último análisis de la cantidad de energía que se consideraría la más aceptable en función de las condiciones de la velocidad y temperatura

del aire de secado, este análisis se lo hace en referencia a la Tabla 3.6 que a continuación se muestra de nuevo.

**Tabla 4.5 Calor de secado absorbido por la Alfalfa de acuerdo a los diferentes tipos de arreglo.**

Arreglo de Lecho ( mm)	Velocidad (m/s)	Temperatura de Ingreso (K)	Temperatura de Salida(K)	Entalpía h1 (KJ/Kg)	Entalpía h2 (KJ/Kg)	Calor de Secado Absorbido por la Alfalfa (KJ/Kg)
50	0,3	393	304	2706	2557,8	-148,2
50	0,6	393	306	2706	2561,4	-144,6
50	1	393	307	2706	2563,2	-142,8
100	0,3	393	328	2706	2601	-105
100	0,6	393	325	2706	2595,6	-110,4
100	1	393	328	2706	2601	-105
150	0,3	393	393	2706	2706	0
150	0,6	393	395	2706	2709,2	3,2
150	1	393	402	2706	2719,6	13,6

Tomando en cuenta el espesor del lecho de alfalfa de 100mm como se ha visto en el análisis de los efectos de la velocidad de secado como el lecho que provee de condiciones aceptables para el secado se toma en cuenta:

De acuerdo a los valores de la velocidad del flujo de aire se considera como velocidad aceptable para el secado de alfalfa de 0.30m/s por ser la mejor en condiciones de acuerdo al comportamiento que se ha hecho en el análisis de velocidades para los lechos de secado de 50, 100 y 150mm.

La temperatura con la que mejor se desarrolla el secado de alfalfa para un arreglo de 100mm está alrededor de los 336.00K esto debido a los análisis realizados, que además con el cálculo de la energía se muestra una tasa de energía requerida de 110.4 KJ/Kg.

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CONCLUSIONES**

Los parámetros que se deben considerar en el proceso de deshidratación de alfalfa son: la velocidad del aire de secado, la temperatura a la que se desarrolla el secado y los arreglos representativos para el lecho de secado de alfalfa.

Las condiciones iniciales necesarias para el secado de alfalfa fueron: contenido de humedad inicial de la alfalfa (78.32%), humedad relativa del aire (50%), temperatura de secado (393.00K), tiempo de secado (500.00 segundos), espesor promedio del lecho de alfalfa (100mm), y una velocidad de secado para el flujo de aire (1.0m/s).

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que para los lechos mayores a 100mm se puede tener retenciones de humedad durante el secado que no son favorables para este proceso debido a que no existe un flujo de calor por el exceso del lecho de alfalfa que no permite la circulación del aire caliente adecuadamente para que se dé el proceso adecuadamente.

## **RECOMENDACIONES**

Con la información mostrada en el presente trabajo se recomienda que, para un modelamiento de un proceso de secado, como es el caso, de la deshidratación de alfalfa, es útil analizar el contenido de humedad de la materia prima con la que se inicia el secado, conocer sus propiedades termodinámicas, y las condiciones iniciales a las que se desarrollará el proceso.

Para poder establecer condiciones estables de secado en el interior de los secadores de banda, es útil cosechar la alfalfa teniendo en cuenta un 10% de floración como base, mantener la humedad de la alfalfa uniforme en tallos y hojas mediante el aplastado y corte en trozos de 50mm.

Es necesario poner en conocimiento de que este trabajo se pone como propuesta para el análisis, diseño y construcción de secadores de banda transportadora para la deshidratación de alfalfa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- [1] CENGEL, Y. & BOLES, M. (2009). Termodinámica (6ta ed.) México: Mc Graw- Hill.
- [2] INCROPERA, F. & De Witt, D. (1999). Fundamentos de la Transferencia de Calor (4ª ed.). México: Prentice Hall.
- [3] MAUPOEY, P., (2001). Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente (1ª ed.), España: UPV.
- [4] PERRY, D. & Chilton C. (1982). Manual del Ingeniero Químico (2da ed.) México: Mc Graw- Hill.
- [5] Rotz C.A., Sprott DJ. (1984). Drying rates, losses and fuel requirements for mowing and conditioning alfalfa. Trans of the ASAE; 27(3):715-20.

### Artículos de Internet

- [6] (2001). Diseño y simulación de una máquina secadora de forrajes múltiples para la elaboración de harina y procesamiento de balanceado para ganado con capacidad de 400 Kg/H para la empresa ENSIFOR S.A.
- [7] Calle, R. & Aparicio, J. (2011) Diseño de una Planta de Deshidratación de Hierbas Aromáticas. Recuperado de:
- [8] Finite Element Analysis and Modeling Software. Recuperado de:  
<http://www.autodesk.com/products/simulation-mechanical/overview>
- [9] Mora, J. (2005). Adaptación de ocho variedades comerciales de alfalfa (medicago sativa) sobre los 2900 M.S.N.M. en el sector de Pailones en la Hcda. El Prado. Recuperado de

[10] McCabe W., Smith J. & Harriott P., (1991) Operaciones Unitarias en ingeniería Química, (4ta. Ed.).

[11]Tord van Delft J., (2010) Modeling and Model Predictive Control of a Conveyor- Belt Dryer. Recuperado de:

<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:626494/FULLTEXT01.pdf>

[12] Mujumdar, A.(2006). Recuperado de A.S. (ed.) Handbook of Industrial Drying (3ed., CRC, 2006) (ISBN1574446681) (1279).pdf

[13] Patil, Sokhansanj, Arinze & Shoenau (1992). Thin layer drying of components of fresh alfalfa. Can. Agric. Eng. 34; 343\_346. Recuperado de:

[14] Psychrometric Data. ASAE D271.2 DEC94.

[15] Seminar: “Thermal treatment of powders and granules” recuperador de:  
[http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2\\_KAHL.pdf](http://www.celsiusprocessing.com/downloads/hotornot/Presentatie2_KAHL.pdf)

[16] **Unit Operations in Food Processing**

Recuperado de: <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/appendix8.htm>

[17] Yang W. (1998), Characteristics of Ground Alfalfa in Relation to Steam Conditioning,  
Recuperado de:

[http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/tape17/PQDD\\_0012/NQ27437.pdf](http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/tape17/PQDD_0012/NQ27437.pdf)

[18] Zheng, X., Jiang, Y., & Pan, Z. (2005). Drying and Quality characteristics of Different Components of Alfalfa. *ASAE Annual Meeting*, 056185, (pp.1-12). DOI: 10.13031/2013.19929

**ANEXO A**

**PSYCHROMETRIC DATA**

# **ANEXO B**

## **STEAM TABLE – SATURATED STEAM**