



CIATEC

SIMULACION Y ESCALAMIENTO INDUSTRIAL  
DE UN SECADOR INFRARROJO PARA EL  
ACABADO DEL CUERO

# Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

Maestro en Ciencia y Tecnología  
en la Especialidad de Ingeniería  
Industrial y de Manufactura

PRESENTA

**Fernando Bravo Bravo**

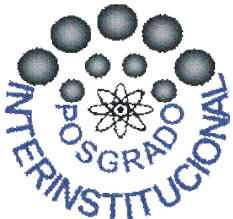
Director

Dr. Sergio Alonso Romero

Co director

M. en C. José Eduardo Frías Chimal

León, Guanajuato, México, Diciembre del 2015



## **RESUMEN**

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo virtual escalado de una máquina que realiza el proceso de secado del acabado del cuero. El túnel de secado emplea paneles infrarrojos con los que evapora el agua contenida en el sustrato de acabado, por lo que se empleó un modelo en 3D de los paneles infrarrojos y se analizó en el software ANSYS CFX para conocer las temperaturas durante el proceso y la cantidad de agua evaporada del acabado del cuero. El método numérico empleado es volumen finito, y los resultados se validaron con la comparación de los datos de evaporación y perfiles térmicos experimentales. El mejor modelo escalado se determinó de un conjunto de modelos virtuales experimentales.

## **AGRADECIMIENTOS**

En la elaboración de este trabajo considero que es absolutamente inverosímil pretender que solamente han intervenido el autor y sus directores. Por eso, deseo reconocer su colaboración:

- Gracias Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por la beca otorgada en este espacio de mi formación profesional.
- Al Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, CIATEC, por abrirme sus puertas durante estos años de preparación académica.
- A mis padres, por todo su cariño y apoyo incondicional, al igual que a mis hermanos.
- A mis amigos del Posgrado y a todos los que no puedo nombrar pero que son importantes en mi formación.

Para todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

ING. FERNANDO BRAVO BRAVO

Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas

Septiembre 2015

# ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice de contenido.....	iii
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tablas.....	ix

## Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes de las aplicaciones de la tecnología infrarroja, simulación en computadora y acabado del cuero.....	1
1.2 Relación de la actual investigación y los trabajos previos.....	2
Planteamiento del problema.....	3
Justificación de la investigación.....	4
Objetivos.....	5
Hipótesis.....	6

## Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Introducción.....	7
2.2 El acabado del cuero.....	7
2.3 Defectos en el acabado por el secado.....	7
2.3.1 Pérdida de superficie del cuero (encogimiento).....	8
2.3.2 Endurecimiento del cuero.....	8
2.3.3 Formación de nata superficial.....	8
2.3.4 Secado no uniforme.....	8
2.4 Equipos de secado para el acabado del cuero.....	9
2.4.1 Secador por convección forzada.....	9
2.4.2 Secador por radiación infrarroja en aplicación de acabado del cuero.....	9

2.5 Modos de transferencia de calor.....	9
2.5.1 Radiación como medio de transferencia de calor.....	9
2.5.2 Tipos de radiación.....	10
2.5.3 Propiedades de la radiación.....	12
2.5.3.1 Reflectividad.....	12
2.5.3.1.1 Reflectividad del agua.....	12
2.5.3.2 Absortividad y la espectrometría de infrarrojos.....	13
2.5.3.3 Curva espectral de absorción del agua.....	14
2.5.3.4 Transmitividad.....	15
2.5.4 Ley de Stefan-Boltzmann.....	15
2.5.5 Transferencia de calor por radiación a superficie.....	16
2.5.6 Transferencia de masa.....	17
2.5 Método de volumen finito.....	18
2.5.1 Introducción al método de volumen finito (MVF).....	18
2.5.2 Etapas de aplicación de volumen finito.....	20
2.5.3 Pre-proceso.....	20
2.5.4 Solución.....	21
2.5.5 Post-proceso.....	21

### Capítulo 3. Equipo y metodología experimental

3.1 Introducción.....	22
3.2 Equipo a emplear en la investigación.....	22
3.3 Metodología de investigación.....	23

3.3.1 Primera etapa: simulación y validación de modelo estacionario.....	23
3.3.2 Segunda etapa: simulación y validación de modelo transitorio de perfiles de temperatura.....	24
3.3.3 Tercera etapa: simulación y validación de modelo de evaporación transitorio.....	24
3.3.4 Cuarta etapa: simulación y determinación del mejor modelo escalado.....	25

#### Capítulo 4: Análisis y discusión de resultados

4.1 Introducción.....	27
4.2 Primera etapa de simulación (modelo estático de temperatura)...	27
4.2.1 Modelo geométrico tridimensional.....	27
4.2.2 Resultado teórico.....	30
4.2.3 Resultado experimental.....	31
4.2.4 Validación de la etapa 1.....	32
4.2.5 Conclusiones del modelo estacionario.....	33
4.3 Segunda etapa: simulación y validación de modelo transitorio de perfiles de temperatura.....	33
4.3.1. Función inicial.....	34
4.3.2 Validación del modelo transitorio.....	39
4.3.3 Conclusiones de la 2° etapa.....	39
4.4 Tercera etapa: porcentaje de evaporación simulación de evaporación.....	40
4.4.1 Simulación de los puntos experimentales de validación.....	40

4.4.2 Resultados punto 1 (tabla 3.1).....	42
4.4.3 Resultados punto 2 (tabla 3.1).....	44
4.4.4 Resultados punto 3 (tabla 3.1).....	46
4.4.5 Resultados punto 4 (tabla 3.1).....	47
4.4.6 Validación de la etapa 3.....	49
4.5 Cuarta etapa: selección del modelo escalable.....	50
4.5.1 Propuestas de escalamiento.....	51
4.5.2 Modelo virtual prototipo escalado.....	53
4.5.3 Resultados de los perfiles térmicos del modelo escalable.....	54
Conclusiones.....	57
Recomendaciones.....	58
Bibliografía.....	59
Apéndice A: Propiedades del gas L.P. GPIT	
Apéndice B: Emisividades normales de metales y no metales	
Apéndice C: Emisividades y absortancia de algunas superficies	
Apéndice D: Patente de referencia	
Apéndice E: Constancias de congresos	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Transferencia de calor por radiación.....	10
Figura 2. 2: Rango de longitud de onda de la radiación infrarroja.....	10
Figura 2. 3: Ley de desplazamiento de Wien.....	12
Figura 2. 4: Tipos de reflectividad.....	13
Figura 2.5: Curva de absorptividad de radiación infrarroja del agua.....	14
Figura 2. 6: Propiedades de la radiación infrarroja.....	15
Figura 2. 7: Condiciones de contorno.....	19
Figura 2.8: Tipos de elementos dimensionales.....	20
Figura 3. 1: Equipo de secado infrarrojo prototipo .....	22
Figura 3. 2: Equipo de medición térmico .....	23
Figura 3. 3: Etapas del desarrollo del proyecto .....	23
Figura 3. 4: Perfiles de temperatura experimentales previos.....	24
Figura 3. 5: Modelos escalables propuesto.....	26
Figura 4. 1: Modelo 3D del túnel de secado dinámico completo.....	27
Figura 4. 2: Modelo 3D simplificado del túnel de secado.....	28
Figura 4. 3 a: Mallado de modelo.....	29
Figura 4. 3 b: Post procesado.....	29
Figura 4. 3 b: Post procesado en estado estacionario.....	29



Figura. 2.4: Resultados simulación modelo estacionario de temperatura superficial en hoja metálica.....	30
Figura 4. 5 a: Temperatura superficial estado estacionario.....	32
Figura 4. 5 b: Fotografía térmica de hoja metálica.....	32
Figura 4.6 a: Función de temperatura inicial.....	34
Figura 4.6 b: Función de temperatura flujo de calor inicial.....	34
Figura 4. 7: Primera aproximación transitoria.....	35
Figura 4.8: Perfil de temperatura transitorio de simulación M16-AS.....	38
Figura 4.9: Comparación simulación y experimentación transitorios.....	39
Figura 4. 10: modelo 3D del sustrato.....	40
Figura 4. 11: Modelo térmico punto 1.....	42
Figura 4. 12: Perfil de temperaturas punto 1.....	42
Figura 4. 13: Resultados de modelo de evaporación punto 1.....	43
Figura 4. 14: Histograma de evaporación punto 1.....	43
Figura 4. 15: Perfil de temperaturas punto 2.....	45
Figura 4. 16: Resultados de modelo de evaporación punto 2.....	45
Figura 4. 17: Histograma de evaporación punto 2.....	46
Figura 4. 18: Perfil de temperaturas punto 3.....	46
Figura 4. 19: Resultados de modelo de evaporación punto 3.....	47
Figura 4. 20: Histograma de evaporación punto 3.....	47
Figura 4. 21: Perfil de temperaturas punto 4.....	48
Figura 4. 22: Resultados de modelo de evaporación punto 4.....	48
Figura 4. 23: Histograma de evaporación punto 4.....	49
Figura 4. 24: Tipo y medidas de los paneles infrarrojos comerciales.....	50

Figura 4. 25: Ejemplo de modelo geométrico escalable.....	51
Figura 4.26: Malla del modelo geométrico de capa de agua a evaporar en cuero 3 metro de largo.....	52
Figura 4. 27: Modelo geométrico escalable.....	53
Figura 4. 28: Perfiles térmicos en superficie de sustrato (modelo escalable).....	54
Figura 4.29: Resultados de simulación de evaporación (modelo escalable).....	55
Figura 4.30: Histograma de evaporación modelo final escalable.....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Valores promedio de porcentaje de evaporación y temperatura de salida.....	25
Tabla 4. 1: Comparación de resultados.....	32
Tabla 4. 2: Análisis de sensibilidad modelo transitorio de temperatura.....	36
Tabla 4. 3: Función de temperatura y flujo de radiación puntos tabla 3.1.....	41
Tabla 4. 4: Sumatoria de fracciones volumétricas de vapor.....	44
Tabla 4.5: Comparación de resultados de simulación y experimentales. ....	49
Tabla 4.6: Consumo energético de los paneles infrarrojos comerciales.....	51
Tabla 4.7: Resultados de simulación de modelos escalables propuestos.....	52



# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se revisaron algunas aplicaciones de la tecnología infrarroja en diferentes industrias, como se ha empleado la simulación para resolver por métodos numéricos procesos de secado de películas de agua y que investigaciones recientes existen acerca del secado del acabado del cuero relevante al proyecto.

## **1.1 ANTECEDENTES DE LAS APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA INFRARROJA, SIMULACIÓN EN COMPUTADORA Y ACABADO DEL CUERO.**

La tecnología infrarroja posee varias aplicaciones en la industria, como lo son las cámaras térmicas y calentadores para diferentes aplicaciones. Como lo menciona Sánchez J. (2007), no existe mucha información científica de la aplicación del infrarrojo para el secado del acabado del cuero. Con excepción de sus artículos publicados y algunos otros muy antiguos. Por ejemplo, Matz, A. y Krawiecki, (1978) trabajaron el secado del cuero en la región espectral entre 1.2 y 2.45  $\mu\text{m}$ . De esa investigación determinaron que el valor óptimo de absorción de energía para el acabado a base de agua ocurre a 1.95  $\mu\text{m}$ , debido a la curva de absorción de energía infrarroja del agua.

También existen aplicaciones numéricas para secado de madera. Thibeault, F. (2010) en su investigación muestran el desarrollo de una simulación del calor 3D y la transferencia de la humedad junto con el comportamiento mecánico de madera de roble durante el proceso de secado. El programa computacional empleado para este proyecto es la licencia ANSYS CFX10 que se utilizó para resolver el problema hidrotérmico y para el comportamiento mecánico.

Los análisis de simulación numérica para representar el efecto de infrarrojo en el software se ha empleado para predecir perfiles térmicos menciona Chang, P. (2006). Realizo la simulación térmica para evaluar la condición térmica de la superficie de un molde de inyección con un sistema de calentamiento rápido de la superficie. Utilizó equipo de medición infrarrojo para validar la simulación..

Un ejemplo muy aplicable a lo que se pretende hacer en este proyecto lo menciona Dhall (2009) en el que desarrollaron el modelo 3D que puede predecir la transferencia de calor infrarroja en el interior de un horno. Su modelo desarrollo exitosamente un nomograma

que predice la transferencia de calor en la cavidad de un horno lo cual le ayudó a reducir tiempos y costos asociados a la experimentación de ensayo y error.

Existen otras aplicaciones de simulación y secado infrarrojo en industrias de mayor nivel como lo es el ramo automotriz. Domnick, J. (2011) realizó con éxito la simulación numérica en ANSYS CFX del proceso de secado en una cámara calentada por infrarrojo, para predecir el tiempo de secado de una película de pintura automotriz a base de agua aplicada a la carrocería de automóviles.

Referente al acabado del cuero, Jons, S. (2006) muestra el análisis estadístico usando diseño de experimentos de un secador infrarrojo. Para mostrar las ventajas de la tecnología infrarroja realizó la comparación de sus resultados con un secador de convección forzada. Concluye que es más eficiente en tamaño y consumo energético el secador infrarrojo. En 2007 Jons et al. Implementan el uso de escudos de reflexión para mejorar la eficiencia del horno infrarrojo. Demuestra que es más eficiente el modelo prototipo de equipo de secado infrarrojo que los de convección forzada actualmente empleados por la industria.

Más adelante Jesús M. (2012) realiza nuevos diseños de escudos de refracción utilizando software de modelado y simulación. Sus resultados fueron comparados con los perfiles térmicos tomados de un equipo de medición infrarrojo. Los resultados fueron cercanos entre lo simulado y lo registrado experimentalmente, lo cual es un excelente punto de partida para este proyecto.

## **1.2 RELACIÓN DE LA ACTUAL INVESTIGACIÓN Y LOS TRABAJOS PREVIOS**

Los anteriores artículos citados en el apartado 1.1 son muestra de la reciente aplicación y demanda industrial del uso de esta tecnología de simulación en diversas industrias, desde alimento hasta aplicaciones automotrices. Algunos de los trabajos encontrados en la literatura son muy similares al presente proyecto, en problemática y objetivos a alcanzar. Sus resultados demuestran la viabilidad del proyecto para satisfacer la hipótesis planteada más adelante.

## **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente el Centro de Innovación Aplicada en Tecnología Competitiva (CIATEC, A. C.) cuenta con un prototipo de un túnel de secado. Este equipo de secado emplea paneles infrarrojos como medio de transferencia de calor para evaporar el agua contenida en la película de sustrato que se aplica en el acabado del cuero. Sin embargo el prototipo solo trabaja con muestras de cuero de un pie cuadrado de superficie, lo que no lo hace atractivo para su uso en la industria. Escalar geoméricamente el prototipo a tamaño industrial es una solución. Sin embargo no se puede garantizar que funcione como el prototipo actual o incluso no se conoce si existe una configuración del equipo que sea más eficiente que el actual. Sí se desea mejorar la eficiencia del secador se necesitaría volver a invertir tiempo y dinero para un solo intento de mejora. La necesidad de evaluar modelos de escalamiento del túnel de secado sin tener que invertir en construir y experimentar con cada prototipo propuesto, genera la necesidad de aplicar métodos numéricos y softwares especializados para su evaluación.

## **JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Para realizar un nuevo o nuevos modelo de túneles escalados de secado que no requieran de muchos recursos, se cuenta con estudios de análisis de simulación numérica como punto medio entre la teoría y la experimentación para evaluar los procesos físicos que ocurren en el túnel de secado del acabado del cuero. En la simulación lo más importante es entender la física que resuelve las variables de interés, las condiciones de frontera y las ecuaciones que se deben activar para la solución. Al introducir correctamente la información al software de simulación numérica, se juega solo con algunas variables, lo que permite experimentar en un número indefinido de modelos nuevos ya que obedecen a la misma física. De esta manera se puede escalar, o incluso mejorar un nuevo prototipo de túnel de secado. El CIATEC, A.C. como centro de desarrollo de tecnología contaría con una nueva herramienta, para promover el equipo de secado infrarrojo y captar el interés de empresas en el ramo de acabado de pieles.



## **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un modelo de simulación utilizando el método numérico de volumen finito de un equipo de secado por infrarrojo para el acabado del cuero para evaluar de manera virtual la mejor propuesta de escalamiento industrial del equipo para una aplicación automotriz.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Desarrollar y validar un modelo virtual de simulación del equipo de secado por infrarrojo para el acabado del cuero, que sea representativo del equipo prototipo actual, enfocándose en la variable de temperatura superficial del cuero en estado estacionario.
2. Desarrollar y validar un modelo virtual de simulación del equipo de secado por infrarrojo para el acabado del cuero, que sea representativo del equipo prototipo actual, enfocándose en la variable de temperatura superficial del cuero en estado transitorio.
3. Desarrollar y validar un modelo virtual de simulación del equipo de secado por infrarrojo para el acabado del cuero, que sea representativo del equipo prototipo actual, enfocándose en la variable de porcentaje de evaporación en estado transitorio.
4. Desarrollar varias propuestas de modelos escalables y determinar el mejor modelo en base a los experimentos realizados en la simulación, enfocándose en la variable de consumo porcentaje de evaporación del sustrato y consumo energético en estado transitorio.

## **HIPÓTESIS**

Se puede reproducir las condiciones del proceso de secado del acabado del cuero mediante el software de análisis y simulación numérica ANSYS CFX. Y con ello realizar experimentación para seleccionar el nuevo modelo prototipo de equipo de secado escalado de manera industrial, que muestre ser la opción más eficiente en consumo de gas para evaporar el 100 % de agua contenida en el sustrato del acabado.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se revisa la información teórica relacionada con la investigación y que sustenta la hipótesis del proyecto. Para ello es necesario conocer lo relacionado al proceso de acabado del cuero, la razón por la que es parte importante en la industria del cuero, los beneficios que otorgan un buen acabado y los defectos que se pueden presentar. Para realizar este proceso se han desarrollado diferentes tecnologías que facilitan y mejoran: la velocidad, la calidad y los costos de producción.

Los secadores infrarrojos surgen como nueva opción en la industria y para ello es necesario conocer la información teórica de transferencia de calor por radiación específicamente por infrarrojo. La simulación de las condiciones de trabajo en materiales, procesos, máquinas y equipos en diversas industrias es la opción más buscada actualmente para predecir resultados, con ello se realizan un sinnúmero de mejoras, incluso sin tener que comprobar cada evento de manera real. Estos métodos de simulación son el punto intermedio entre la teoría y la realidad. Uno de los métodos más utilizados para simulaciones que involucran fluidos y procesos térmicos como intercambio de calor y transporte de masa es el de volumen finito, por lo que es necesario conocer acerca de él

### **2.2 El acabado del cuero**

El acabado del cuero es un proceso que se realiza en seis etapas: pintado, secado, planchado, ablandado, clasificado y medido. El objetivo fundamental del acabado es mejorar las propiedades físicas y estéticas del material curtido. Como por ejemplo, incrementar la protección frente a la humedad, la suciedad, también el aspecto del cuero cubriendo defectos naturales o producidos en las operaciones previas del proceso de fabricación. Otra mejora es el aumento de la resistencia en pruebas físicas, como lo son la resistencia a la luz del sol, resistencia al mojar el artículo, resistencia al rasgado, adherencia, flexión, entre otras que se exigen para cada artículo.

### **2.3 Defectos en el acabado por el secado**

Como su nombre lo indican los defectos en el cuero son eventos indeseables. Estos defectos son provocados por un mal secado. Dentro de los principales defectos se

pueden mencionar los siguientes: pérdida de superficie; endurecimiento; formación de nata superficial y secado no uniforme.

### **2.3.1 Pérdida de superficie del cuero (encogimiento)**

La reducción de la superficie es un efecto indeseado al momento de secar el acabado. Se debe fundamentalmente a calentamientos excesivos en el trayecto en el túnel de secado. Esto elimina la humedad propia del cuero, provocando su encogimiento y dando un aspecto indeseable. Esta pérdida de superficie puede disminuirse en los procesos mecánicos del acabado como en el ablandado pero no se logra una compensación total. Es importante seleccionar temperaturas suaves de secado.

### **2.3.2 Endurecimiento del cuero**

Las temperaturas muy altas en el secado o un tipo de curtido no resistente de estas temperaturas o un engrase menor, pueden ocasionar un endurecimiento del cuero. En la actualidad se emplean diversas máquinas secadoras que realizan el proceso de forma automática o semiautomática evitando excederse en el secado.

### **2.3.3 Formación de nata superficial en el acabado del cuero**

No solo las altas temperaturas afectan al cuero y el acabado del mismo, sino también los cambios bruscos de temperatura. Por ejemplo, se puede llevar la temperatura del sustrato a los 120°C de manera gradual y en un tiempo relativamente largo o de manera súbita en un tiempo relativamente corto. La rapidez con la que se haga el calentamiento es un factor que influye en la formación de lo que se conoce como nata. La nata es una capa fina de película del sustrato que se secó de forma externa y esta encierra una película de sustrato húmeda entre la superficie del cuero y la película de sustrato seca, evitando así la evaporación del agua atrapada bajo la superficie. Cabe mencionar que no existe un estudio o artículo que hable acerca de cómo o bajo qué condiciones aparece este fenómeno, por lo que no existe una referencia base para evitar este fenómeno.

### **2.3.4 Secado no uniforme**

Tan malo es calentar de más como hacerlo de menos. A bajas temperaturas de secado, se corre el riesgo de que la superficie del cuero quede húmeda a la salida. Esto puede provocar zonas en las que no se evapore el sustrato, dejando un acabado no uniforme. Por lo tanto son estéticamente indeseables y una pérdida para la industria.

## **2.4 Equipos de secado para el acabado del cuero**

La industria del curtido es muy antigua lo que ha hecho que esta actividad haya evolucionado de manera que existen desde equipos muy básicos y que hacen uso de la energía del sol como medio de secado, hasta equipos con diversas fuentes de energía como lo son el gas y la electricidad. A continuación se habla de manera general de los túneles de secado.

### **2.4.1 Secador por convección forzada**

El túnel de secado por convección forzada consta de varios ventiladores que como su nombre lo dice fuerzan la entrada de aire caliente de manera turbulenta, su fuente de energía para calentar el aire puede ser por gas o con resistencias eléctricas utilizando un sistema similar al de los radiadores de los automóviles.

### **2.4.2 Secador por radiación infrarroja en aplicación de acabado del cuero**

Un secador infrarrojo puede funcionar con lámparas que utilicen electricidad o paneles que utilicen gas o algún combustible. La principal aplicación está en el secado superficial de películas acuosas. Al ser radiación su método de transferencia de calor no requieren ventiladores como los de convección forzada, ni ningún medio para realizar la transferencia de calor. También poseen la ventaja ser equipos más pequeños comparados con los de convección forzada los cuales que llegan a medir hasta 15 metros.

## **2.5 Modos de transferencia de calor**

Todos los libros de transferencia de calor y termodinámica mencionan que existen tres tipos de transferencia de calor: Conducción, Convección y Radiación. Como ya se mencionó el medio de transferencia de calor relevante al proyecto es la radiación.

### **2.5.1 Radiación como medio de transferencia de calor**

Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas (Figura 2.1), lo cual hace posible la transferencia sin necesidad de un medio físico como ocurre en la conducción y la convección. Recordemos que el presente trabajo se centra en la tercera forma de calor que es la radiación, por lo que nos enfocaremos en la información relevante para este medio de transferencia de calor.

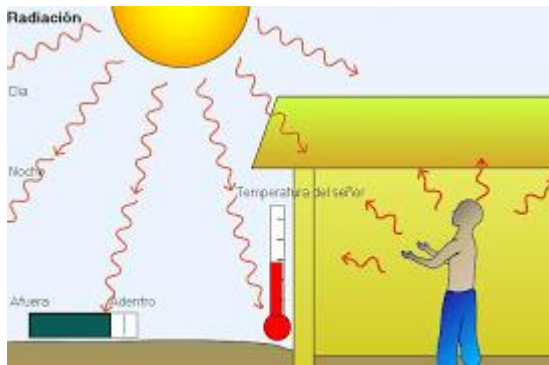


Figura 2.1: Transferencia de calor por radiación

## 2.5.2 Tipos de radiación

La radiación es el conjunto de ondas emitidas por alguna fuente de energía, y dependiendo de la longitud de onda emitida por la fuente energética, se clasifica el tipo de radiación.

Los 7 tipos de radiación son:

- 1) Radiación de radio
- 2) Radiación de microondas
- 3) Radiación infrarroja
- 4) Radiación visible
- 5) Radiación ultravioleta
- 6) Radiación x
- 7) Radiación gamma

En la Figura 2.2 se muestran las radiaciones electromagnéticas y su clasificación de acuerdo a su longitud de onda.

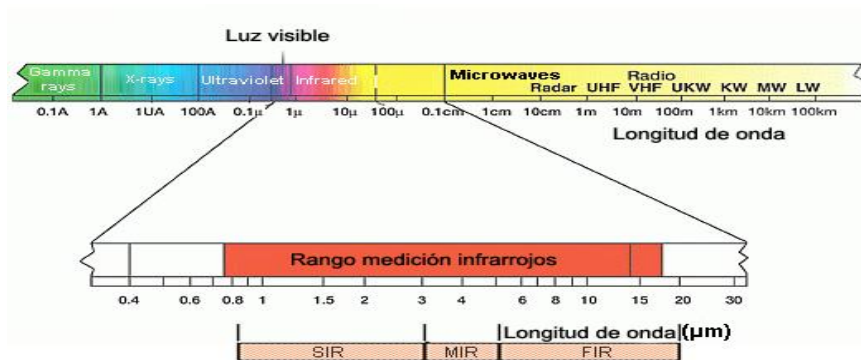


Figura 2.2: Rango de longitud de onda de la radiación infrarroja

De toda esta gama de radiaciones la única de interés para el proyecto es la radiación infrarroja la cual es un tipo de radiación electromagnética y térmica, de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 0,7 hasta los 1000 micrómetros.

Los infrarrojos se clasifican de acuerdo a su longitud de onda:

- 1) Infrarrojo cercano (de 0.78  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ )
- 2) Infrarrojo medio (de 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ )
- 3) Infrarrojo lejano (de 5  $\mu\text{m}$  a 1 mm)<sup>1</sup>

En termodinámica existen los comportamientos ideales tomados como referencia y que sirven para analizar otros materiales comparándolos con ellos. Tal es el caso de los cuerpos negros, los cuales son objetos ideales que absorben toda la luz y radiación que incide sobre ellos. La intensidad de energía emitida por un cuerpo negro, que posee una cierta temperatura T y frecuencia  $\lambda$ , viene dada por la ley de Planck (Ecuación 1), la cual es válida para una superficie en el vacío o en un gas.

$$E(\lambda, T) = \frac{3.742 \times 10^8}{\lambda^5 \left[ \exp \left[ \frac{1.439 \times 10^4}{\lambda T} \right] - 1 \right]} \left[ \frac{W * \mu m}{m^2} \right] \quad (1)$$

Donde:

$\lambda$  = longitud de onda (m)

T = temperatura del cuerpo negro ( $^{\circ}\text{K}$ )

La longitud de onda en la que se produce el máximo de emisión viene dada por la ley Wien (Ecuación 2). Esta ley especifica que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura (Figura 2. 3).

$$\lambda_{max} = \frac{0.0028976 \text{ m } ^{\circ}\text{K}}{T} \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> <http://www.academiatesto.com.ar/cms/?q=radiacion-infrarroja-en-el-espectro-de-ondas-2>

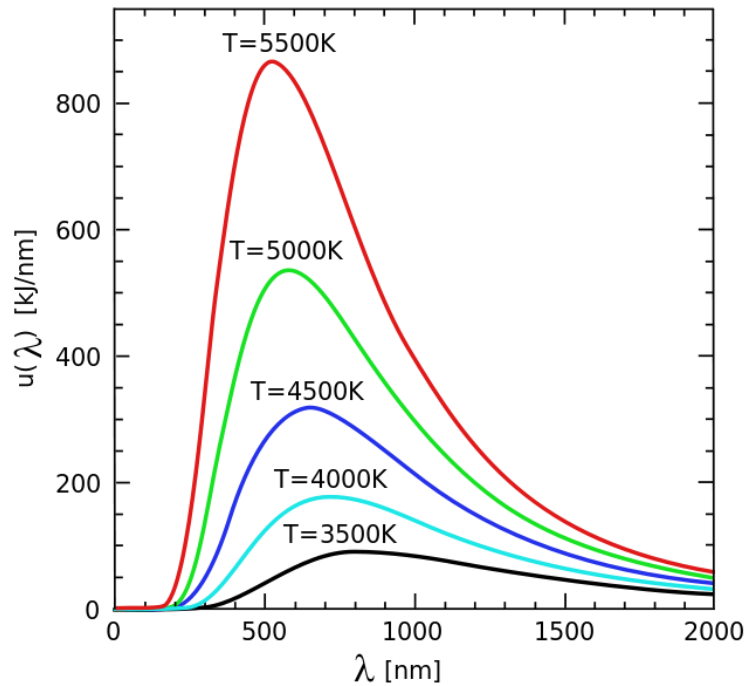


Figura 2. 3: Ley de desplazamiento de Wien

## 2.5.3 Propiedades de la radiación

Menciona Cengel (2003) que cuando la radiación incide en un cuerpo parte de esta es reflejada, otra es absorbida y el resto es transmitida. La fracción que es absorbida es conocida como absorptividad ( $\alpha$ ), la parte reflejada es la reflectividad ( $\rho$ ) y la transmitida es la transmitividad ( $\tau$ ). La fracción de radiación absorbida, emitida y transmitida depende de los coeficientes respectivos, que para cada material es diferente.

### 2.5.3.1 Reflectividad

La reflectividad es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie. En general debe tratársela como una propiedad direccional, en función de la dirección reflejada, de la dirección incidente, y de la longitud de onda incidente. Sin embargo comúnmente es también promediada sobre el hemisferio reflejado para dar la reflectividad espectral hemisférica

#### 2.5.3.1.1 Reflectividad del agua

La reflectividad de un cuerpo se puede presentar de dos maneras: especular o difusa. Cuando un rayo de la luz incidente en un cuerpo y es reflejada en una sola dirección se



se llama reflectividad especular; cuando el rayo que incide se refleja en varias direcciones se llama reflectividad difusa (Figura 2.4). Para determinar el tipo de reflectividad que tiene el agua depende de cómo se encuentre su superficie si es una superficie plana tipo espejo será especular, si es rugosa o con ondas será difusa. En el caso de nuestro objeto de estudio “el sustrato”, se espera una reflectividad difusa ya que la superficie del cuero es rugosa y no permite que se forme una capa de sustrato uniforme o tipo espejo.

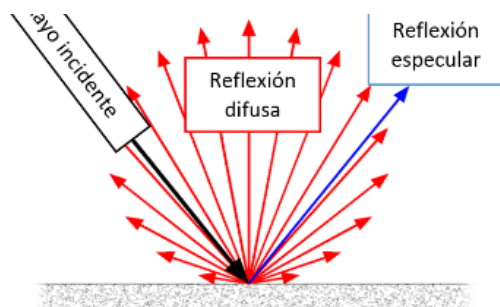


Figura 2.4: Tipos de reflectividad

### 2.5.3.2 Absortividad y la espectrometría de infrarrojos

La espectrometría de infrarrojos es un tipo de espectrometría de absorción que utiliza la región infrarroja del espectro electromagnético. La espectrometría infrarroja se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas a una longitud de onda del espectro infrarrojo, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie, de la energía potencial de la molécula del material que se emplea, de la geometría molecular del material a analizar, de las masas atómicas del material y, posiblemente del acoplamiento vibracional. Si la molécula recibe luz con la misma energía de esa vibración, entonces la luz será absorbida si se dan ciertas condiciones.

La espectrometría de infrarrojos trabaja en los niveles de energía dependiendo del material, y es diferente para cada uno; incluso dos objetos del mismo material pero de colores diferentes pueden tener diferencia en su absortividad.

Seyd-Yagoobi y Wirtz (2001) enfatizan su preferencia por trabajar con emisores infrarrojos de cerámica a temperaturas entre los 800 a 1100 °C. A esta temperatura el espectro electromagnético es el orden de 1.6 a 10  $\mu\text{m}$  (entre el infrarrojo cercano y

lejano) y el aprovechamiento del calor es mejor que los emisores eléctricos debido a la curva de absorción del material que emplearon para calentar. A continuación se explica la curva de absorción para el material (agua).

### 2.5.3.3 Curva espectral de absorción del agua

La curva espectral de la absorción (Figura 2. 5), muestra el rango de las longitudes de onda que el agua absorberá la radiación infrarroja así como el porcentaje de la absorción. En la práctica real, los agentes que colorean y otros añadidos cambiarán el comportamiento de la curva. Sin embargo, la curva se puede utilizar para conseguir una idea general del rango de la radiación infrarroja que el material absorberá.

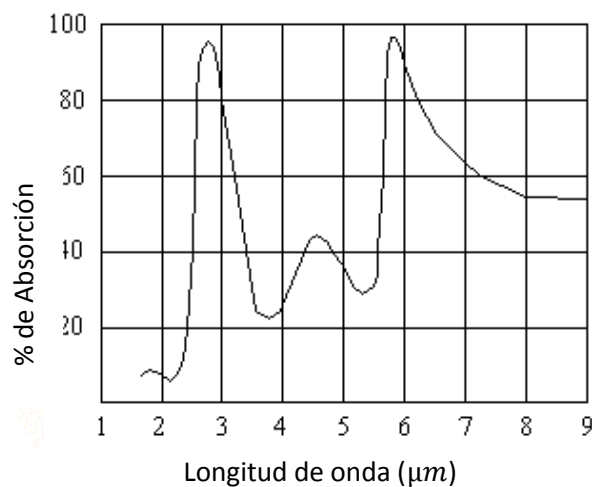


Figura 2. 5: Curva de absorción de radiación infrarroja del agua

De la figura 2.5 se concluye que el agua tiene su mayor absorción de ~98% en 2 puntos. Los cuales menciona Jons (2006), la primera cresta se encuentra en las longitudes de onda ~2.95  $\mu\text{m}$  (la cual se obtiene a ~708°C) y la segunda ~6 $\mu\text{m}$  (se obtiene a ~210°C). Menciona que la ley de Planck enuncia que mientras mayor sea la temperatura mayor será el calor emitido. Por lo tanto la mayor eficiencia se obtiene al usar la fuente de calor infrarrojo con la mayor temperatura, que corresponde al máximo calor absorbido posible por el agua que es la de 708°C. Sin embargo el quemador del equipo infrarrojo trabaja a una temperatura de ~820° C con gas LP (medido en laboratorio). Aplicando la ley de Wien la longitud de onda a la que se encuentra es ~2.65  $\mu\text{m}$  con ~ 80% de absorción.

### 2.5.3.4 Transmitividad

Es la capacidad de un material de dejar pasar radiación infrarroja, es decir, de transmitirla. Una lámina fina de plástico, por ejemplo, tiene una elevada transmitividad. Si se intenta medir mediante una cámara termográfica la temperatura de una lámina fina de plástico colocada delante de la fachada de una casa, el resultado de la medición no será la temperatura de la lámina, sino la de la fachada de la casa. Este es sin embargo un caso excepcional. La mayoría de los materiales no dejan pasar la radiación infrarroja, por lo que la transmitividad de la mayoría de los materiales es prácticamente 0 y se puede despreciar.

En resumen todo cuerpo no negro que es impactado por la radiación se comporta como lo indica la figura 2.6.

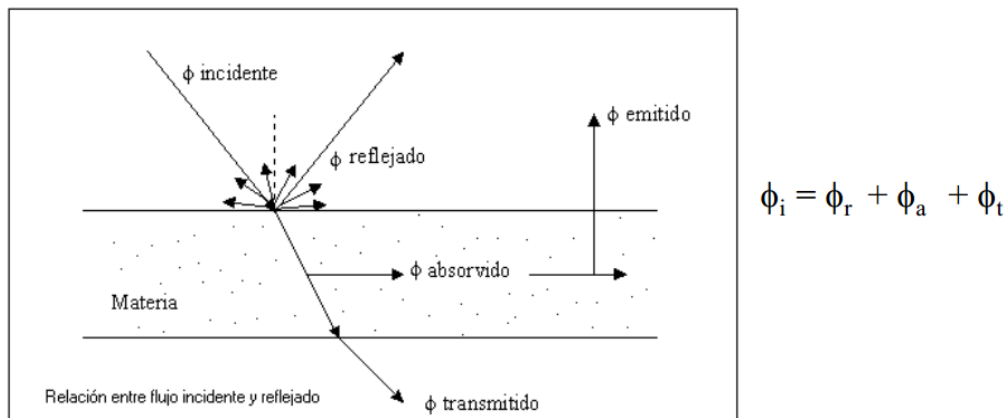


Figura 2. 6: Propiedades de la radiación infrarroja

En la figura 2.6 se observa un material siendo irradiado por infrarrojo. Una parte de la radiación que incide es absorbida, otra es reflejada que depende del ángulo de incidencia de la fuente de radiación y otra parte es transmitida. Por otra parte, el material al mismo tiempo emite radiación al medio ambiente hasta alcanzar el equilibrio térmico.

### 2.5.4 Ley de Stefan-Boltzmann

Para obtener la potencia total emitida por un cuerpo negro se utiliza la ley de Stefan Boltzmann (ecuación 3). La cual establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total ( $W/m^2$ ) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$E = \sigma T_e^4 \quad (3)$$

Donde:

$E$  = La potencia emitida por una superficie

$T_e$  = Temperatura efectiva

$\sigma$  = Constante de Stefan Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  ó  $1.712 \times 10^{-9} \frac{BTU}{ft^2 R^4}$

La ecuación 3 es solo válida para cuerpos negros, para un cuerpo real la ecuación anterior (ahora **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4**) queda como sigue:

$$E\alpha = \sigma T_e^4 \beta \quad (4)$$

Donde:

$\beta$  = es la emisividad de la superficie y su valor está dentro del intervalo  $0 \leq \beta \leq 1$ .

$\alpha$  = coeficiente de absorción del material y su valor está dentro del intervalo  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

### 2.5.5 Transferencia de calor por radiación a superficie

Bird (2006) cap. 16 habla de la transferencia de calor por radiación, mostrando varios ejemplos. El más relevante para el proyecto es el del calentamiento de una azotea mediante radiación solar y una temperatura ambiente, el cual lo resuelve con la ecuación (5) que es aplicable al proyecto por la similitud con el secador infrarrojo y la superficie del cuero.

$$Q_{rad} \cos \theta \alpha = h(T_s - T_{air}) + \sigma \beta T_e^4 \quad (5)$$

$Q_{rad}$ : Flujo de calor de la fuente de radiación

$\theta$ : Ángulo de incidencia entre la superficie y la fuente de radiación

$\alpha$ : Absortividad del material

$h$ : Coeficiente de transmisión de calor por convección libre

$\sigma$ : Constante de Stephan Boltzman

$\beta$ : Emisividad del material

$T_e^4$ : Temperatura efectiva de la superficie

### 2.5.6 Transferencia de masa

Los fenómenos de transporte tienen lugar en aquellos procesos, conocidos como procesos de transferencia. En ellos se establece el movimiento de una propiedad (masa, momentum o energía) en una o varias direcciones bajo la acción de una fuerza impulsora. Al movimiento de una propiedad se le llama flujo. La transferencia de masa cambia la composición de soluciones y mezclas mediante métodos que no implican necesariamente reacciones químicas. Y se caracteriza por transferir una sustancia a través de otra u otras a escala molecular.

La ecuación (6) obtenida de la biblioteca de teoría del software ANSYS CFX calcula la razón de evaporación o transferencia de masa, la cual se expresa de manera general como sigue:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \epsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (6)$$

$m_p$  = masa específica (kg)

$c_p$  = calor específico estado líquido (J/kg K)

$\frac{dT_p}{dt}$  = Cambio de Temperatura de saturación (K) respecto al tiempo

$h$  = Coeficiente de convección ( $W/m^2 * K$ )

$A_p$  = Area expuesta del fluido ( $m^2$ )

$T_\infty$  = Temperatura de fase continua (K)

$\frac{dm_p}{dt}$  = Relacion de Evaporación respecto al tiempo (kg/s)

$h_{fg}$  = calor latente (kg)

$\epsilon_p =$  Coeficiente de emisividad del fluido

$\sigma =$  Constante de Stephan Boltzman

$\theta_R =$  temperatura de radición  $\left(\frac{I}{4\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}$ , donde  $I$  es la intensidad de radiación

## 2.5 MÉTODO DE VOLUMEN FINITO

### 2.5.1 Introducción al método de volumen finito (MVF)

Los métodos de análisis finitos han adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc. Permiten resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Permiten proponer un modelo matemático de cálculo del sistema real, el cual es más fácil y económico de modificar que un prototipo físicamente construido. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

La idea general del método de los volúmenes finitos es la división de un volumen continuo en un conjunto de pequeños volúmenes interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es definido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio. Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor.

- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas (Figura 2. 7).

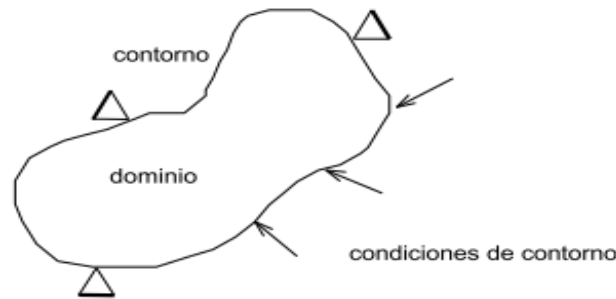


Figura 2. 7: Condiciones de contorno

El método de volumen finito supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias. De manera que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado o posición del nodo.

En primer lugar, y para poder generar la malla de volúmenes finitos, se ha de crear un modelo geométrico del dominio, en el que se utiliza algún programa especializado. El siguiente paso en el método de volumen finito es la generación de la malla de volúmenes finitos, en el programa seleccionado, que se empleará en la discretización espacial del problema. En la generación de mallas, el tamaño de los elementos viene determinado por la capacidad computacional disponible para la solución del problema. Así que si disponemos de un solo ordenador personal deberemos generar mallas de pocos

elementos, mientras que si tenemos una gran computadora o varios equipos conectados en paralelo podremos llegar hasta tamaño de elementos mucho menores. Como es de esperar, la exactitud de la solución dependerá del tamaño de los elementos que definan la malla; como es obvio, para tamaño los elementos pequeños se obtienen resultados mejores que con elementos grandes.

### 2.5.2 Etapas de aplicación de volumen finito

La metodología básica para cualquier tipo de análisis de simulación por volumen finito realizado por softwares especiales, consta de tres módulos principales:

### 2.5.3 Pre-proceso

Etapa en la cual se define el problema a resolver mediante las siguientes subetapas:

Creación de la geometría del modelo. Debe representar lo más relevante del modelo físico en estudio.

Selección del Tipo de elemento finito: dentro de las librerías de los software se encuentra una gran variedad de tipos de elementos uni, bi y tridimensionales, con los cuales simulamos barras, vigas, cáscaras, placas, y elementos sólidos, etc. (Figura 2.8).

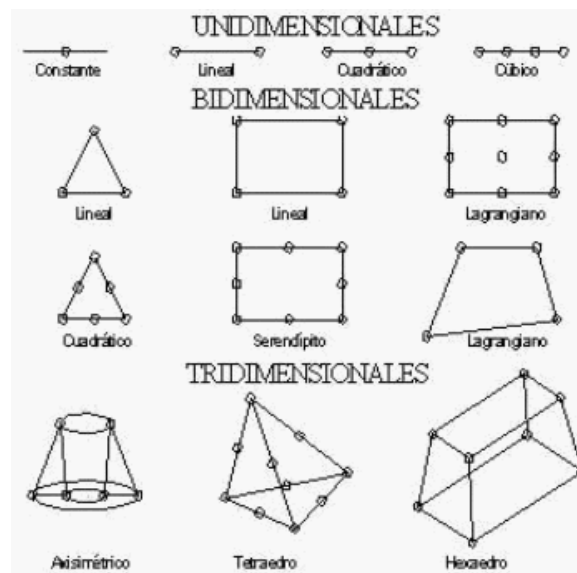


Figura 2.8: Tipos de elementos dimensionales

Selección de las características geométricas y mecánicas del material: en esta etapa son asignados alturas, momentos de inercia, espesores, áreas transversales, módulos de elasticidad, coeficiente de Poisson, etc., para cada tipo de elemento del modelo.



#### **2.5.4 Solución**

Durante la fase de solución se asigna el tipo de análisis aplicado al modelo, las condiciones de contorno del modelo, las cargas aplicadas, valores iniciales, etc. Por último se procede a resolver los sistemas de ecuaciones resultantes de la etapa anterior.

#### **2.5.5 Post-proceso**

La etapa de post-proceso e interpretación de los resultados numéricos obtenidos en la etapa de solución es de gran importancia, ya que no necesariamente los resultados obtenidos son correctos. Dentro de la función del ingeniero, la acertada interpretación de la enorme cantidad de información que entregan las herramientas informáticas será preponderante a la hora de diferenciar un buen diseño de otro realizado deficientemente.

## CAPÍTULO 3. EQUIPO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se discuten los aspectos relacionados con el equipo y los pasos realizados a lo largo del proyecto para satisfacer la hipótesis y alcanzar los objetivos de la investigación.

### 3.2 EQUIPO A EMPLEAR EN LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo del proyecto fue necesario el uso de un software de diseño (DS SOLIDWORKS) en el que se desarrolló el modelo geométrico representativo del equipo de secado infrarrojo. Se usó el software de simulación para termo fluidos (ANSYS CFX), el cual contiene un módulo de discretización de elementos geométricos aparte de un módulo de solución de las ecuaciones la solución y otro modulo que muestra los resultados obtenidos en diversos tipos de gráficas.

El equipo de secado infrarrojo del laboratorio (Figura 3.1) está formado por un túnel con medidas de 4 metros de largo y 1 de ancho, la estructura está hecha de PTR y forrado de lámina de acero. En su interior cuenta con 4 paneles infrarrojo a gas LP serie RSCA3 de la marca SPACE-RAY (En el capítulo 4 se detallan los tipos de paneles infrarrojos). También cuenta con una cubierta de lámina de aluminio acabado espejo que rodea a los paneles y tiene la función de escudos que reflejan los rayos infrarrojos.



*Figura 3. 1: Equipo de secado infrarrojo prototipo*

El equipo empleado de medición térmico estuvo conformado por un pirómetro digital tipo pistola y la cámara infrarroja marca FLUKE (Figura 3.2).



Figura 3. 2: Equipo de medición térmico

### 3.3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para la solución del problema se propuso dividir el proyecto en cuatro etapas, como se muestra en la figura 3.3. En cada etapa se busca cumplir un objetivo específico.

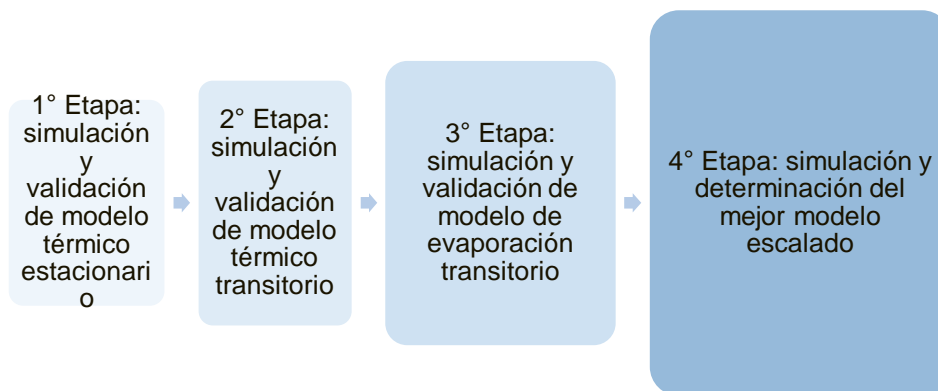


Figura 3. 3: Etapas del desarrollo del proyecto

#### 3.3.1 Primera etapa: simulación y validación de modelo estacionario

En esta etapa se desarrolló la simulación térmica del prototipo representado en 3D, que analiza la temperatura estacionaria de una hoja metálica (aluminio acabado espejo). El fin de esta etapa fue validar las condiciones de frontera del modelo de simulación. Se tomó la temperatura en una hoja metálica real bajo el panel de manera estática hasta alcanzar el equilibrio térmico. Para validar esta etapa se compararon los resultados

obtenidos por experimentación con los obtenidos por simulación térmica bajo las mismas condiciones de frontera, lo que sirvió de base para el modelo transitorio de la etapa siguiente.

### 3.3.2 Segunda etapa: simulación y validación de modelo transitorio de perfiles de temperatura

En esta etapa se desarrolló el modelo de simulación térmica que analiza la temperatura transitoria sobre la superficie del sustrato. Para validar el modelo se compararon los resultados con los perfiles experimentales de temperatura de la figura 3.4. Los cuales son el promedio de resultados obtenidos por experimentación transitoria de la temperatura superficial de un cuero dentro del túnel. (Para más información sobre la experimentación y obtención de los perfiles térmicos superficiales revisar: Romero Sergio A. R. 2007. Patente. Equipo de secado por infrarrojo para el acabado del cuero. Mxgt05000012 (a). Internacional).

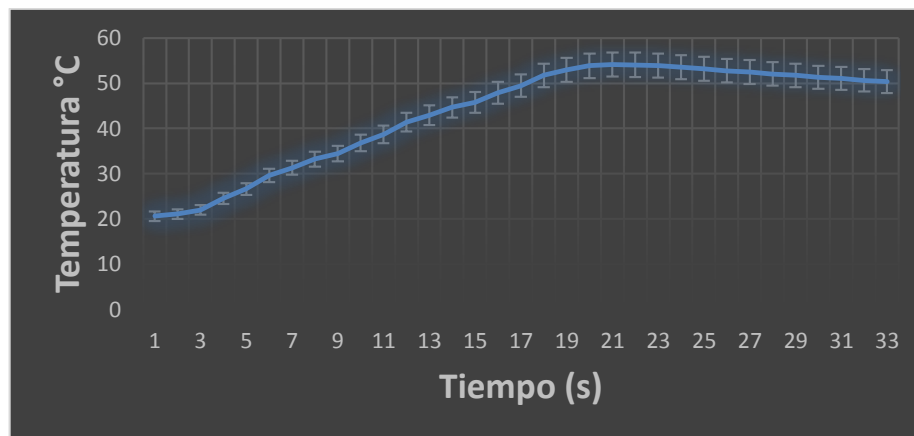


Figura 3.4: Perfiles de temperatura experimentales previos<sup>1</sup>

### 3.3.3 Tercera etapa: simulación y validación de modelo de evaporación transitorio

En esta etapa se desarrolló la simulación térmica y de transferencia de masa que analiza la cantidad de agua contenida en el sustrato que se evapora en el trayecto de secado

<sup>1</sup> Romero Sergio A. R. 2007. Patente. System for drying a leather finish film using infrared energy. MXGT05000012 (A). Internacional.

dentro del túnel. Se simularon las condiciones de la tabla 3.1. Para validar el modelo se compararon los resultados de simulación con los de la tabla 3.1.

*Tabla 3.1: Valores promedio de porcentaje de evaporación y temperatura de salida.<sup>2</sup>*

Corrida	A	B	Evaporación %	Temperatura de salida(°C)
1	-1	-1	105	95
2	-1	1	51	69
3	1	1	36	56
4	1	-1	72	86

A = Gramaje de la película (3.99, 6.30 gr)  
 B = Velocidad de transporte (7.68, 15.36 m/min)  
 Nota: se utilizaron tres paneles y la distancia de cada uno hasta las probetas se mantuvo en 20 centímetros

En resumen el modelo estacionario de la etapa 1 sirvió para generar el modelo transitorio de la etapa 2, y los resultados de la etapa 2 se convierten en la entrada para realizar la etapa 3.

### 3.3.4 Cuarta etapa: simulación y determinación del mejor modelo escalado

En esta etapa se desarrollaron varios modelos escalados del equipo de secado por infrarrojo. Estos modelos fueron diseñados para que entren cueros de hasta 3 metros de ancho (tamaño promedio de un cuero completo en industria automotriz), y evaporen 10 gr de sustrato (gramaje usual en la industria automotriz). Se dejaron como variables para las nuevas propuestas de escalamiento la velocidad de transporte de la banda entre 8m/min y 16 m/min, la distancia del panel al sustrato (20 y 30 cm), la cantidad y tipos de paneles a emplear, esto fue para aprovechar los conocimientos obtenidos del trabajo previo realizado por Jons et al. (2007). El objetivo de esta etapa fue determinar el modelo

<sup>2</sup> Table de Sánchez A. J (2007) Improvements for infrared drying : a leather finishing application, table 4.8, pág 73)

más eficiente de entre los propuestos que sea más que evapore ~100% del agua contenida dentro del sustrato.

En la figura 3.5 se muestran las configuraciones de los modelos propuestos para escalamiento, en el capítulo 4 se muestra las dimensiones y características de cada tipo de panel.

Las configuraciones de los modelos propuestos para escalamiento. En el capítulo 4 se muestra las dimensiones y características de cada tipo de panel.

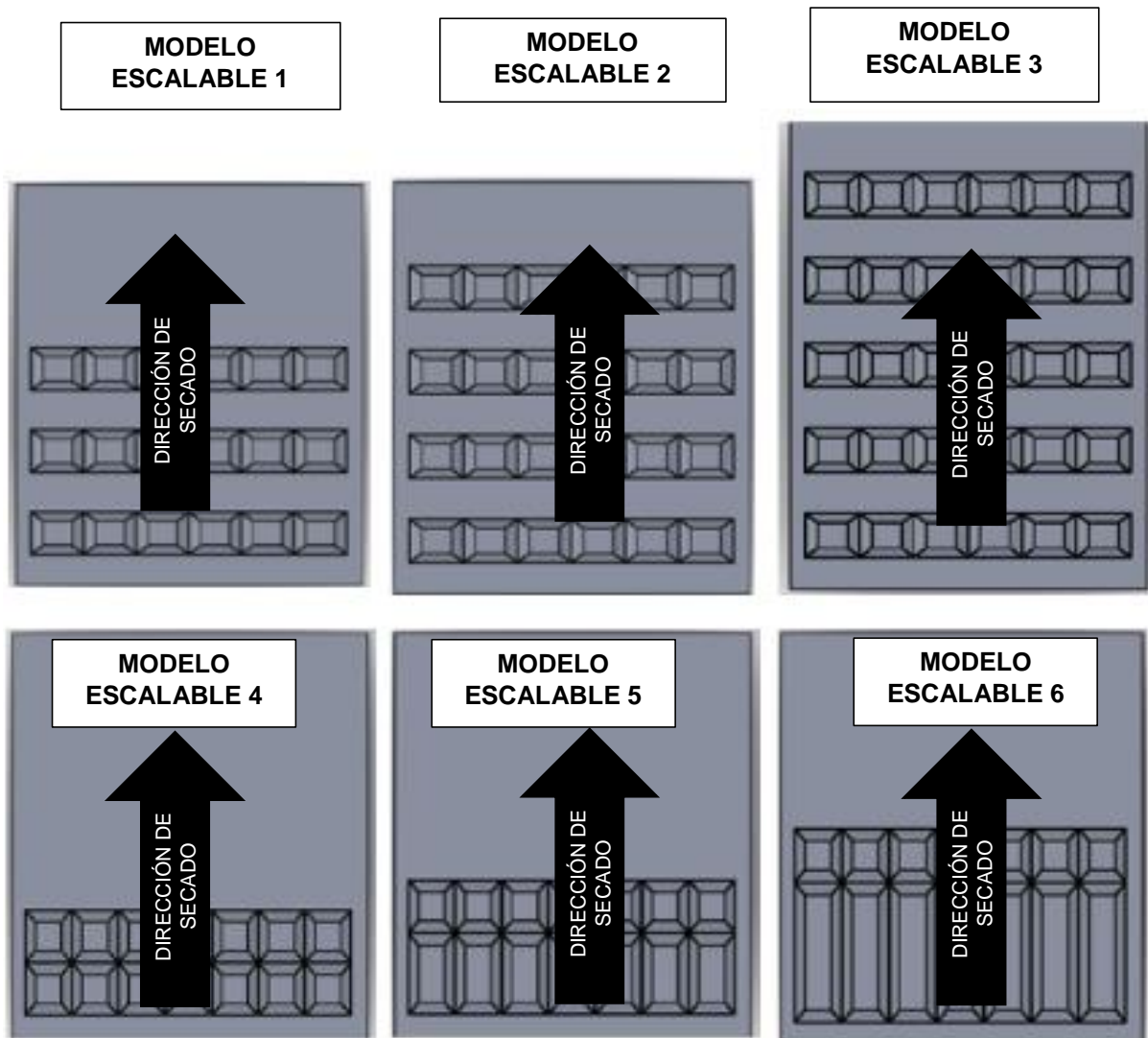


Figura 3. 5: Modelos escalables propuestos

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

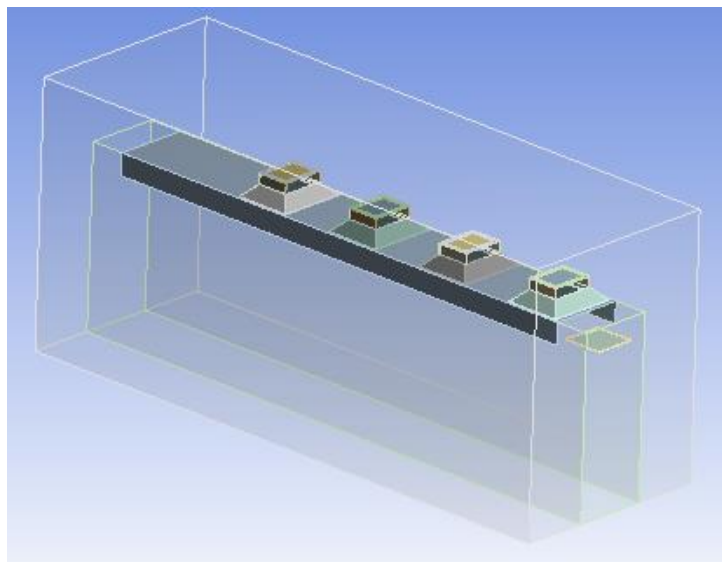
En el presente capítulo se analiza a detalle los logros de la investigación. Se contrastan los resultados obtenidos por medios analíticos, simulación de los procesos térmicos durante el secado y los obtenidos por experimentación en el prototipo de laboratorio del CIATEC, A.C. Las diferentes etapas del proyecto se realizan de manera que simplifican el modelo computacional y facilitan la solución de las variables de temperatura y evaporación. El cumplimiento de cada etapa marca un objetivo alcanzado, la suma de estos objetivos satisfacen el objetivo general y por consecuencia a la hipótesis de investigación.

### 4.2 PRIMERA ETAPA DE SIMULACIÓN (MODELO ESTÁTICO DE TEMPERATURA)

Como ya se mencionó en el capítulo 3, en esta etapa se simula un modelo estático que sirve para validar las condiciones de frontera del modelo de simulación.

#### 4.2.1 Modelo geométrico tridimensional

En un comienzo se tenía considerado un modelo dinámico completo del secador (figura 4.1), en el que el cuero fuese el que se transportara de inicio al fin del trayecto.



*Figura 4. 1: modelo 3D del túnel de secado dinámico completo*

Sin embargo para simplificar el análisis numérico se propuso un modelo estático estacionario con un solo panel infrarrojo, y el sustrato de forma también estática debajo del mismo (figura 4.2).

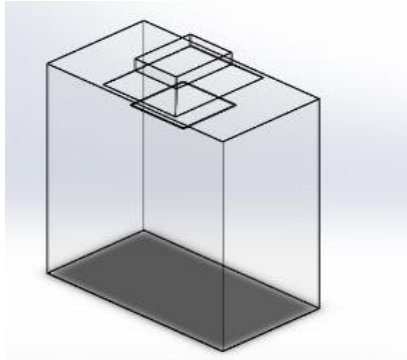


Figura 4.2: Modelo 3D simplificado del túnel de secado

Para evaluar el modelo en estado estacionario se diseñó un experimento, el cual consistió en dejar una hoja de aluminio representando la superficie del cuero debajo del panel, hasta alcanzar la temperatura de equilibrio.

Se midieron experimentalmente la temperatura en la superficie del panel infrarrojo y en la superficie de la hoja de aluminio. Para ello se empleó un pirómetro laser el cual con una emisividad de 0.95 (emisividad para el panel de cerámica establecida por tablas de propiedades físicas de los materiales anexo), registro una temperatura  $\sim 820^{\circ}\text{C}$  en la superficie del panel infrarrojo. Para la hoja de aluminio con una emisividad de 0.07 (emisividad del aluminio acabado espejo) se registró una temperatura de  $723^{\circ}\text{C}$ . Se midió la temperatura del aire a  $25^{\circ}\text{C}$  y se consideró que no había flujo de aire circundante por lo tanto su velocidad era 0 en todas las direcciones ya que también se encuentra estática la hoja metálica (aluminio) y el túnel se encuentra dentro de un recinto cerrado sin ventilación.

En la figura 4.3a se muestra la parte del pre-proceso en ANSYS CFX del modelo geométrico 3D, en la que se observa que el mallado cuenta con 25859 nodos y 28244 elementos volumétricos de tipo hexaédricos de tamaño  $\sim 3$  mm. El modelo cuenta con una calidad de malla de 0.8 promedio la cual es bastante buena.



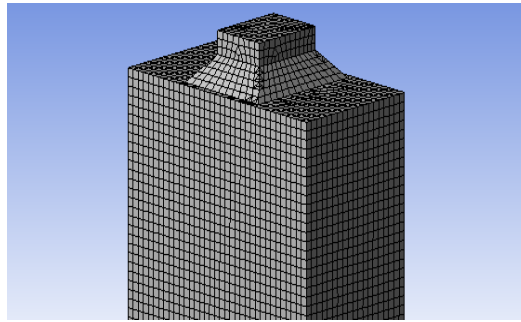


Figura 4.3a: Mallado de modelo

En la figura 4.3b se observa la etapa de proceso para el modelo estacionario en la que se introduce el tipo de dominio de interés el cual en este caso es aire, también se designan los tipos de condiciones de frontera que conforman el dominio como lo son las entradas, salidas, paredes y aperturas que tenga el modelo. Dentro de las condiciones de frontera se designan los valores necesarios para el análisis como lo son las velocidades de entrada, tipo de flujo, temperatura circundante ambiente, temperatura de entrada, coeficiente de emisividad, etc. Como ya se mencionó estas condiciones fueron las que se obtuvieron por parte del experimento para estado estacionario.

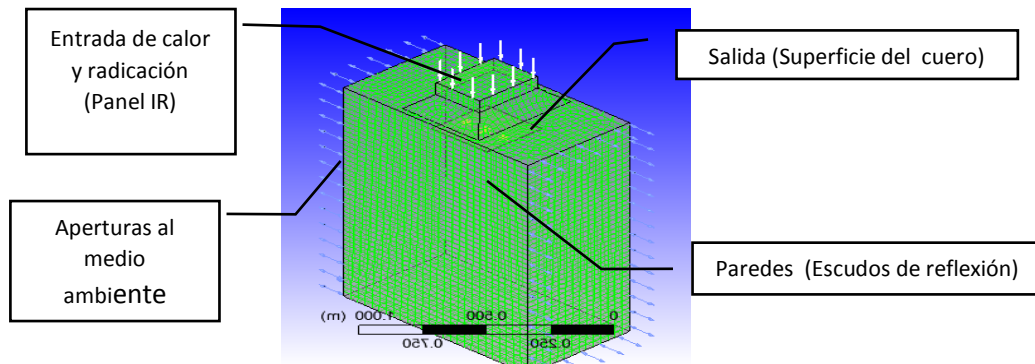


Figura 4.3b: Procesado del modelo (introducción de las condiciones de frontera)

En la figura 4.3c se muestra el post procesado en estado estacionario, en esta parte se obtienen los resultados de temperatura en los puntos que se desee analizar.

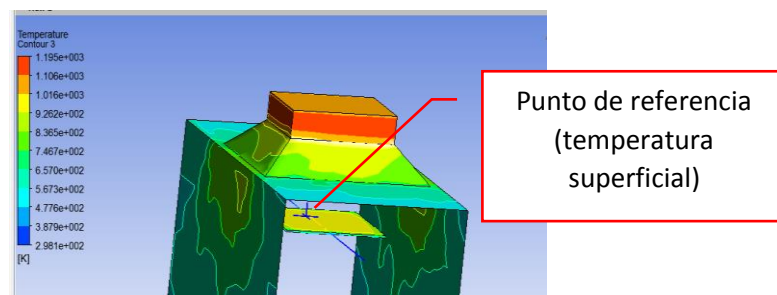


Figura 4.3c: Post procesado estado estacionario

En la figura 4.4 a se muestra la temperatura estacionaria de la superficie de la hoja metálica obtenida por simulación en ANSYS CFX, la cual fue medida en el punto céntrico de la superficie mostrado en la figura 4.3, la temperatura que alcanza es ~1005°K (732°C).

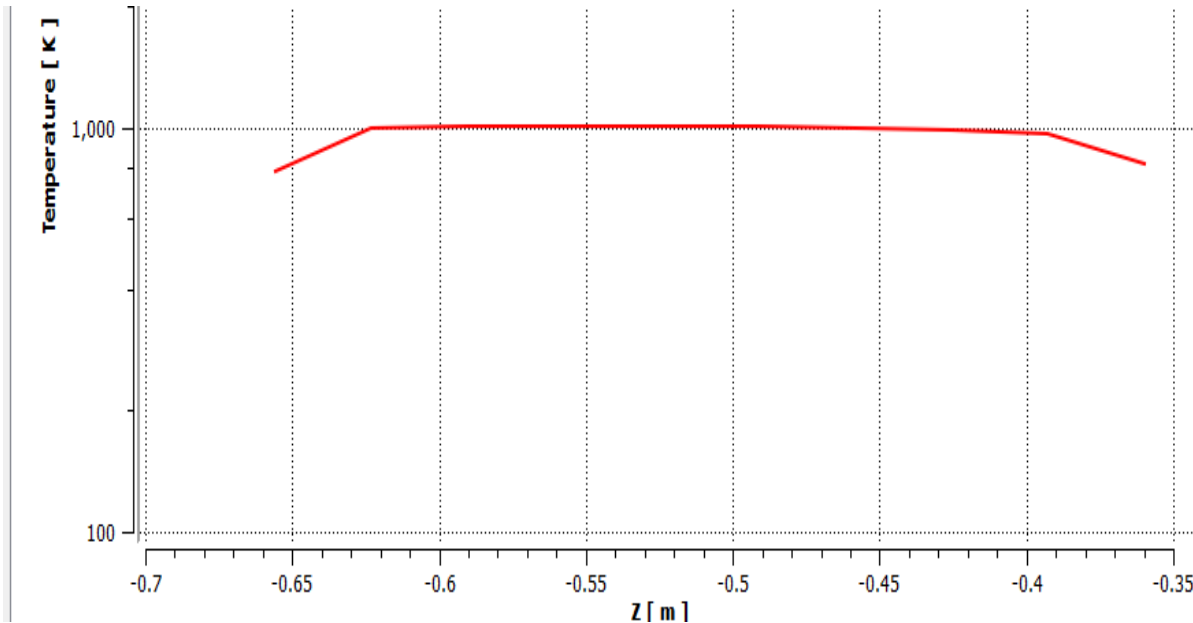


Figura. 2.4: Resultados simulación modelo estacionario de temperatura superficial en hoja metálica

En la etapa 2 se explica cómo es que se transforma este modelo de simulación térmica con el cuero estático y en estado estacionario a un modelo con el cuero estático en estado transitorio y que es equivalente a uno dinámico transitorio, empleando el mismo modelo geométrico.

#### 4.2.2 Resultado teórico

El cálculo de temperatura superficial estacionario se muestran a continuación.

Utilizando la ecuación 5

$$Q_{rad} \cos \theta \alpha = h (T_s - T_{air}) + \sigma \beta T_e^4$$

Como la literatura sugiere en Bird (2006) cap.16 se desprecia el término de convección libre ya que este no afecta significativamente el resultado y facilita el cálculo de la temperatura.

$$Q_{rad} \cos \theta \alpha = \cancel{h (T_s - T_{air})} + \sigma \beta T_e^4$$

$$Q_{rad} \cos \theta \alpha = \sigma \beta T_e^4$$

Como la superficie del cuero es paralela a la superficie del panel infrarrojo, además se ubica de manera simétrica debajo del mismo el ángulo de incidencia  $\theta = 0^\circ$ . De esta manera nos queda la ecuación 4 que es la ley de Stephan Boltzman para cuerpos grises.

$$E\alpha = \sigma T_e^4 \beta$$

Considerando lo siguiente:

$Q_{rad} = E = 26000 \text{ Btu/hr}$  (flujo de calor de la fuente térmica infrarroja)

$\alpha = 0.05$  (Absortividad del aluminio tabla apéndice c)

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} = 1.714 \times 10^{-9} \frac{BTU}{ft^2 R^4}$  (constante de Stephan Boltzman)

$\beta = 0.07$  (Emisividad del aluminio apéndice b.)

Obtenemos:

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{(26000)(0.05)}{(1.712 \times 10^{-9})(0.07)}} = 1814^\circ R \sim 735^\circ C$$

#### 4.2.3 Resultado experimental

En la figura 4.5 a se observa la temperatura en estado estacionario de la hoja metálica, la cual registro una temperatura de  $723^\circ C$ . En la figura 4.5 b se muestra una fotografía térmica de la hoja de aluminio, que se encuentra a la temperatura de equilibrio. Esta fue tomada con la cámara infrarroja, sin embargo por las limitaciones de la lente de la cámara, esta no proporciona la temperatura de la hoja metálica, solo indica que la temperatura es mayor a  $621^\circ C$  (límite de la lente).

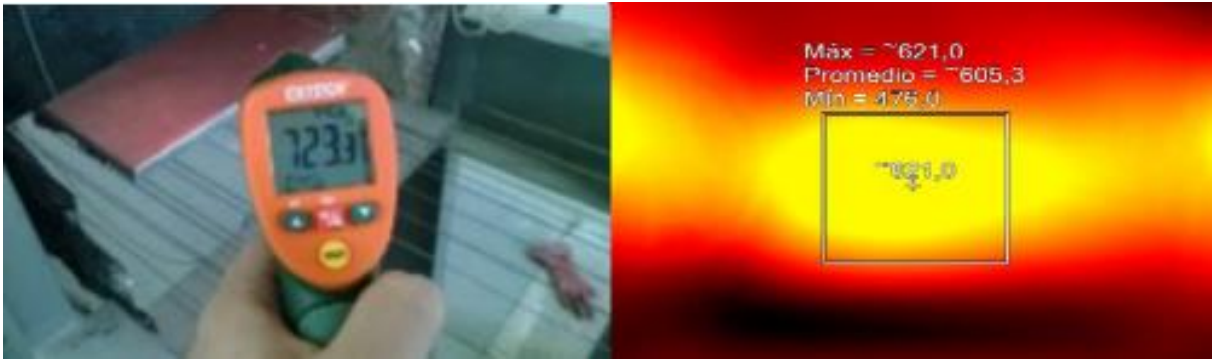


Figura 4.5 a: Temperatura superficial estado estacionario

Figura 4.5 b: Fotografía térmica de hoja metálica

#### 4.2.4 Validación de la etapa 1

Para la parte de validación es muy importante que los resultados sean lo más cercanos a la realidad, por lo que los resultados experimentales se usaron como punto de comparación. También se compararon los resultados de simulación y experimentación con la parte teórica.

Para el cálculo del porcentaje de error se utilizó la siguiente formula:

$$\%error = \frac{abs [Temp. Experimental - Temp. a comparar]}{Temp. Experimental} \times 100$$

La tabla 4.1 muestra los porcentajes de error del modelo de simulación estacionario con respecto a sus contrapartes teórica y experimental.

Tabla 4. 1: Comparación de resultados

	TEMP (°C)	% ERROR
SIMULACIÓN	732	1.2
CALCULO 1	735	1.6
EXPERIMENTACIÓN	723	Punto de referencia

#### **4.2.5 Conclusiones del modelo estacionario**

En este modelo se introdujo la temperatura del panel a 820 °C. Dicha temperatura se midió directamente de los paneles del túnel de secado y se introdujo en las condiciones de frontera. Según el fabricante la temperatura máxima del gas LP es ~ 980°C, sin embargo el pirómetro detectó ~820°C. Se tomó como temperatura base los 820°C, ya que se asume que la diferencia es debido a que como no se conoce con exactitud el tipo de gas o mezcla empleados experimentalmente su temperatura de combustión es alrededor de los 820°C y se tiene confianza en el instrumento de medición ya que es parte del equipo de medición del centro de investigación CIATEC, A.C y se realizó la misma medición con pirómetros laser diferentes. En cuanto al flujo de calor radiante de 26000 Btu/ h ft<sup>2</sup> como lo marca el fabricante, se consideró como el verdadero valor o que se encuentra muy cercano a él ya que no se cuenta con una manera de medirlo.

La conclusión es que la información técnica proporcionada es confiable y que las condiciones dentro del modelo también lo son. El objetivo de esta primera etapa de simulación fue encontrar la temperatura en estado estacionario tanto de forma analítica, simulada y experimental, el cual se cumplió satisfactoriamente su objetivo.

#### **4.3 SEGUNDA ETAPA: SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELO TRANSITORIO DE PERFILES DE TEMPERATURA**

Como ya se mencionó en el capítulo 3, en esta etapa se buscó la manera de simplificar el modelo. La simplificación consistió en pasar de un modelo completo dinámico en estado transitorio a uno que analizara el cuero y el sustrato de manera estática debajo de un solo panel. Entonces, ¿Cómo se pretende simular el proceso de secado en estado transitorio, si no se mueve el sustrato con el cuero y pasa por solo un panel infrarrojo?

Imaginemos una partícula del sustrato que está a punto de entrar al túnel de secado. Dicha partícula se mueve sobre el cuero y es transportada a la velocidad de la banda. En algún momento se encontrara justamente debajo del primer panel infrarrojo, y permanecerá unos segundos a lo largo del panel. Durante el tiempo que permanezca debajo de panel la partícula estará expuesta al calor del mismo. Al término del primer panel sentirá una baja de temperatura brusca al no estar expuesto al calor. Después seguirá su trayecto hasta estar debajo del segundo panel y ocurrirá lo mismo, y así

sucesivamente con los diferentes paneles que puedan existir. Finalmente al pasar el último panel irá perdiendo calor hasta alcanzar la temperatura ambiente (ley de enfriamiento de Newton).

Para simular el paso de la partícula por debajo de la serie de paneles infrarrojos, se buscó una función que variara la temperatura y flujo de radiación del panel infrarrojo. Como se mencionó anteriormente dicha función debía ser equivalente como si estuviera en movimiento la partícula de sustrato durante el trayecto de secado. Para construir la función equivalente sabemos que el sustrato pasa por tres paneles en determinados momentos. La distancia del túnel es de cuatro metros y la banda se mueve a ~ 8 metros por minuto, por lo que el proceso toma ~30 segundos. También se deben respetar la temperatura máxima y flujo de radiación establecidos en la 1° etapa.

#### 4.3.1 Función inicial

Para el primer modelo transitorio se pensó en una función tipo escalonada para la temperatura y el flujo de calor por radiación, como punto de partida para analizar el comportamiento de los perfiles térmicos a lo largo del proceso de secado. Dichas funciones se muestran a continuación en las figuras 4.6 a y 4.6 b.

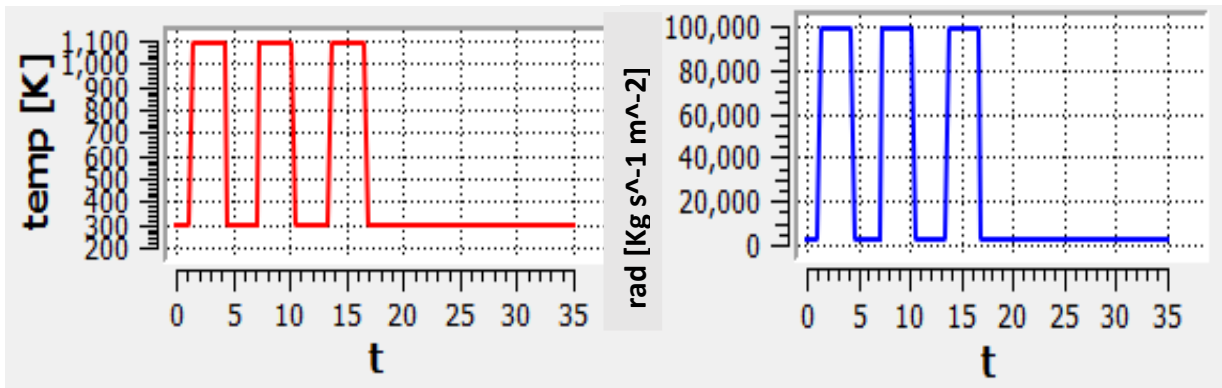


Figura 4.6 a: Función de temperatura inicial

Figura 4.6 b: Función de flujo de calor inicial

Los resultados de la primera aproximación se muestran a continuación en la figura 4.7.

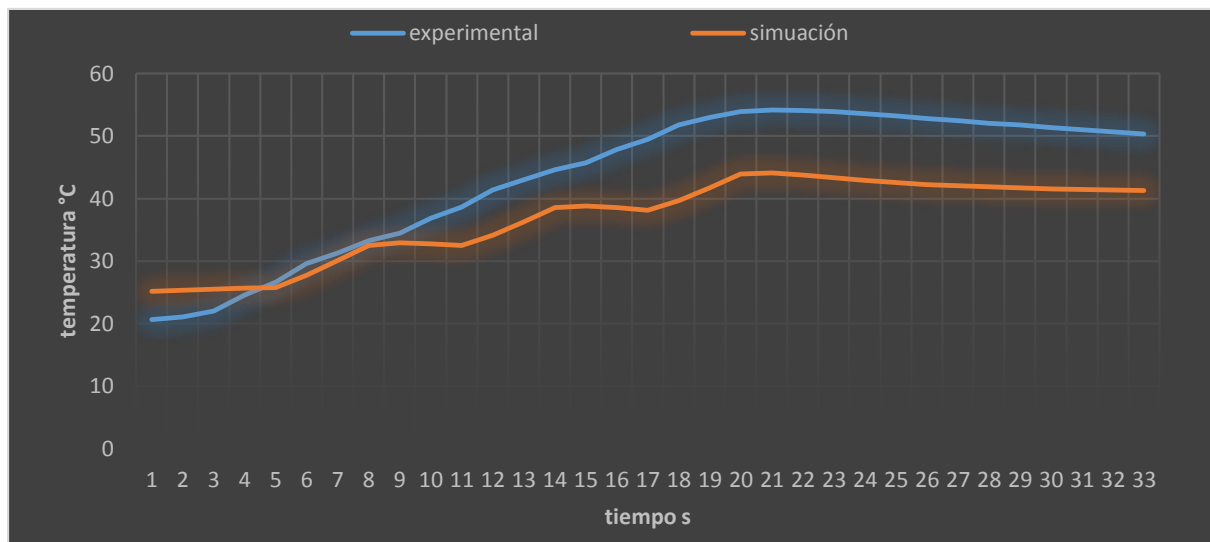


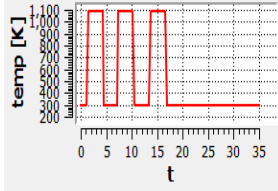
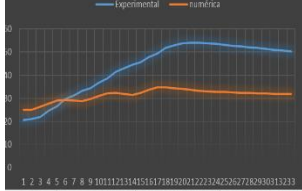
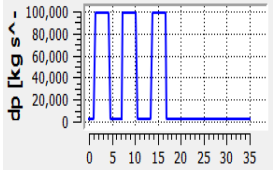
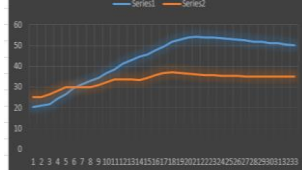
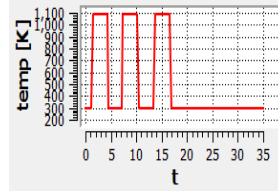
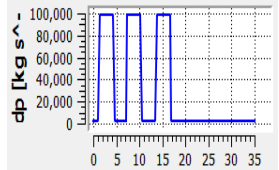
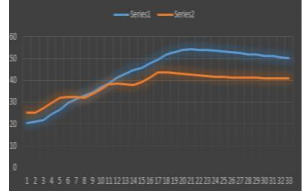
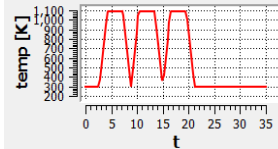
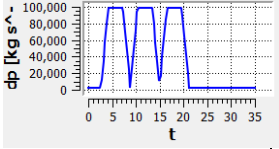

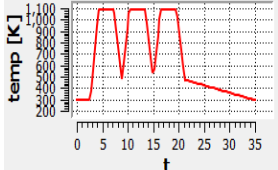
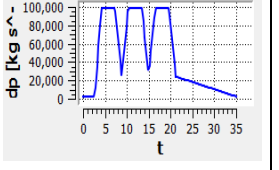
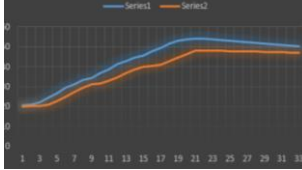
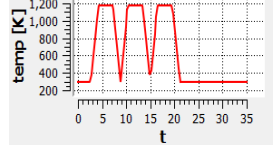
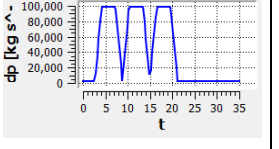

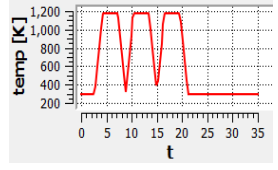
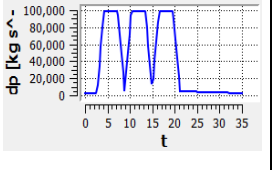

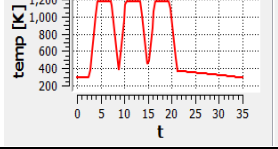
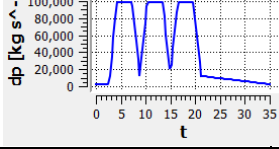
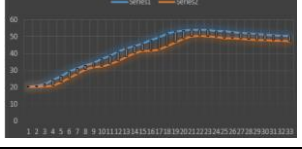
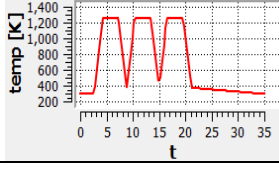
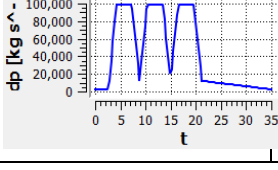
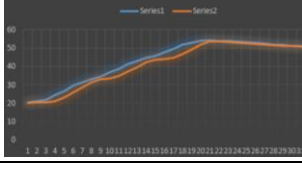
Figura 4. 7: Primera aproximación transitoria

A simple vista se puede observar que tiene algo de similitud el comportamiento de la simulación, pero con bastante diferencia entre la temperatura experimental y numérica. Sin embargo era de esperarse ya que es la primera aproximación, y el comportamiento de la temperatura como el de la radiación no son los más cercanos a la realidad. En la realidad la partícula de sustrato percibe la temperatura del panel mucho antes de estar debajo de él.

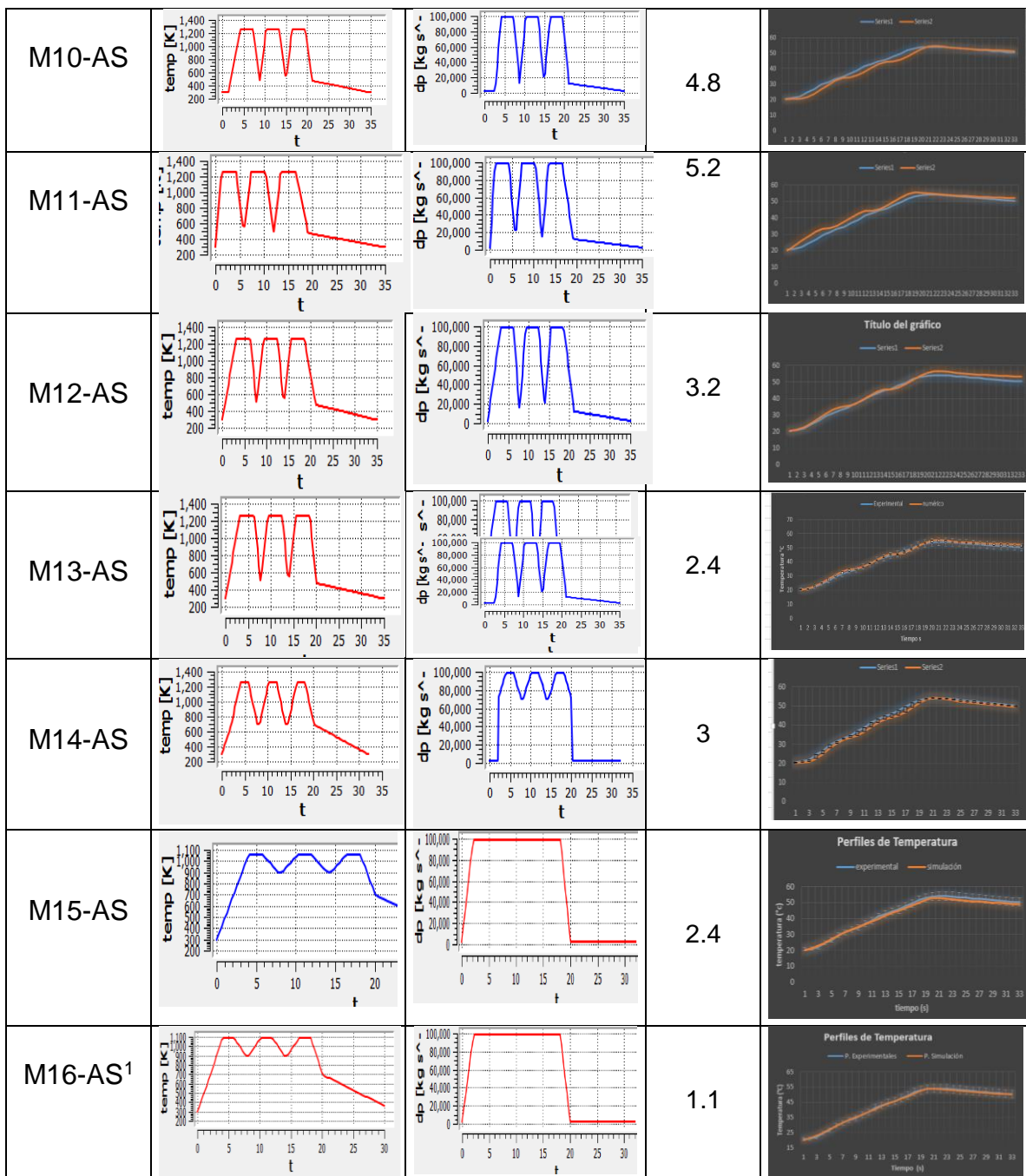
Para corregir las funciones se realizó un estudio de sensibilidad, el cual consistió en agregar puntos intermedios en las funciones; estos puntos suavizaron y elevaron los perfiles de temperatura. El resultado cuyo comportamiento de la función de temperatura y flujo de radiación se acercara más a los resultados experimentales determino la función equivalente.

A continuación en la tabla 4.2 se muestra el análisis de sensibilidad, realizado para encontrar las funciones de temperatura y flujo de radiación del panel infrarrojo que valide el modelo transitorio.

Tabla 4. 2: Análisis de sensibilidad modelo transitorio de temperatura

MODELO	FUNCIÓN DE TEMPERATURA	FUNCIÓN DE RADIACIÓN	% ERROR	GRÁFICA COMPARACIÓN
M1-AS		NA	27.6	
M2-AS	NA		24	
M3-AS			15.9	
M4-AS			14.6	
M5-AS			11.1	
M6-AS			10.8	
M7-AS			10.3	
M8-AS			9.1	
M9-AS			4.9	





Como se puede observar en el modelo M1-AS se introdujo como condición de frontera únicamente la función de temperatura tipo escalón y no se introdujo la de flujo de calor por radiación, lo cual mostro un resultado bastante lejano al buscado. Después se evaluó de manera contraria únicamente con la función escalón de flujo de calor por radiación, de igual manera el resultado fue lejano al buscado. Lo anterior se hizo para ver el

<sup>1</sup> M16: número de modelo de simulación –AS : análisis de sensibilidad

comportamiento de los perfiles de temperatura y confirmar que efectivamente es necesario introducir ambas funciones, pues estas se encuentran presentes como condiciones de frontera en el modelo. Cuando se integraron ambas funciones como se muestra en el modelo M3-AS se mejoró mucho el resultado y comenzó a parecerse al perfil térmico transitorio experimental. Eventualmente se cambiaron las funciones escalón por funciones con caídas semi triangulares, y se fueron ajustando hasta que el error fue menor al 10% lo usual para validación de simulación. Para determinar el modelo de simulación más cercano a los resultados experimentales, se obtuvo el promedio del porcentaje de error. El porcentaje error representa que tan cerca están los puntos de temperatura de la simulación respecto a los experimentales. El porcentaje de error fue calculado con la siguiente formula.

$$\% Error_i = 100 - ABS \left( \frac{temperatura\ simulación_i}{temperatura\ experimental_i} * 100 \right)$$

El modelo (M16-A-S), fue el más cercano a los resultados experimentales. A continuación se muestra la gráfica del perfil de temperatura resultante en la superficie del sustrato (figura 4.8).

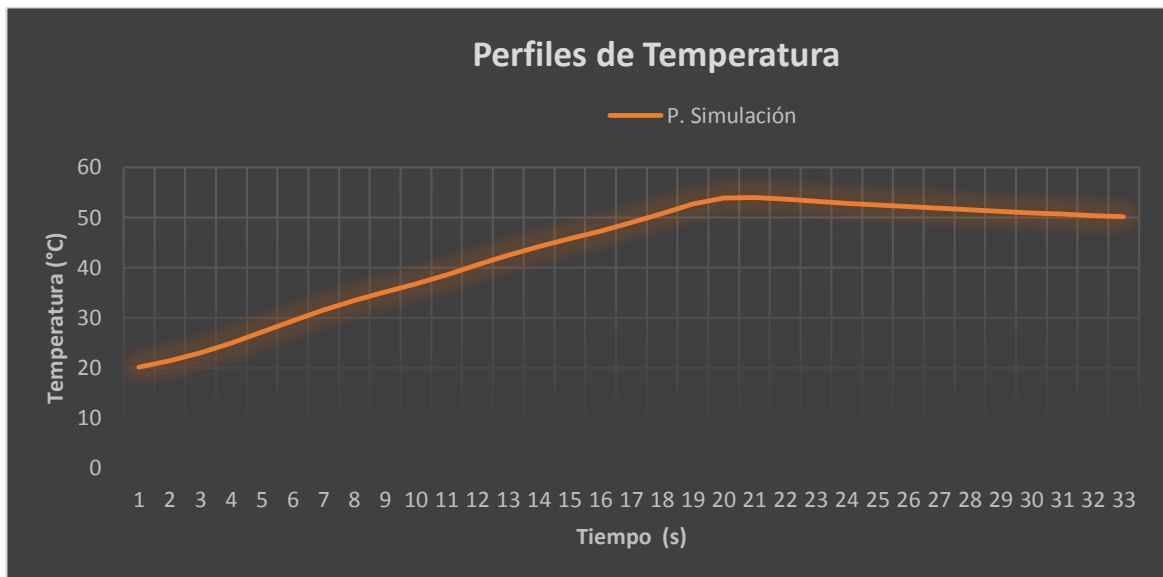


Figura 4.8: Perfil de temperatura transitorio de simulación M16-AS

De este modelo se puede concluir que el calor por radiación es casi el mismo durante todo el trayecto, sin importar que se encuentre la partícula en medio de dos paneles. Lo

cual corresponde a la teoría ya que el ángulo de incidencia llega a ser de  $45^\circ$  y flujo de calor es proporcional al coseno de dicho ángulo.

#### 4.3.2 Validación del modelo transitorio

En la figura 4.9 se observa la comparación de la simulación con el resultado experimental<sup>2</sup> en el equipo de secado, el error promedio es de 1.17%. Esto da confianza en el resultado y uso de las funciones de temperatura.

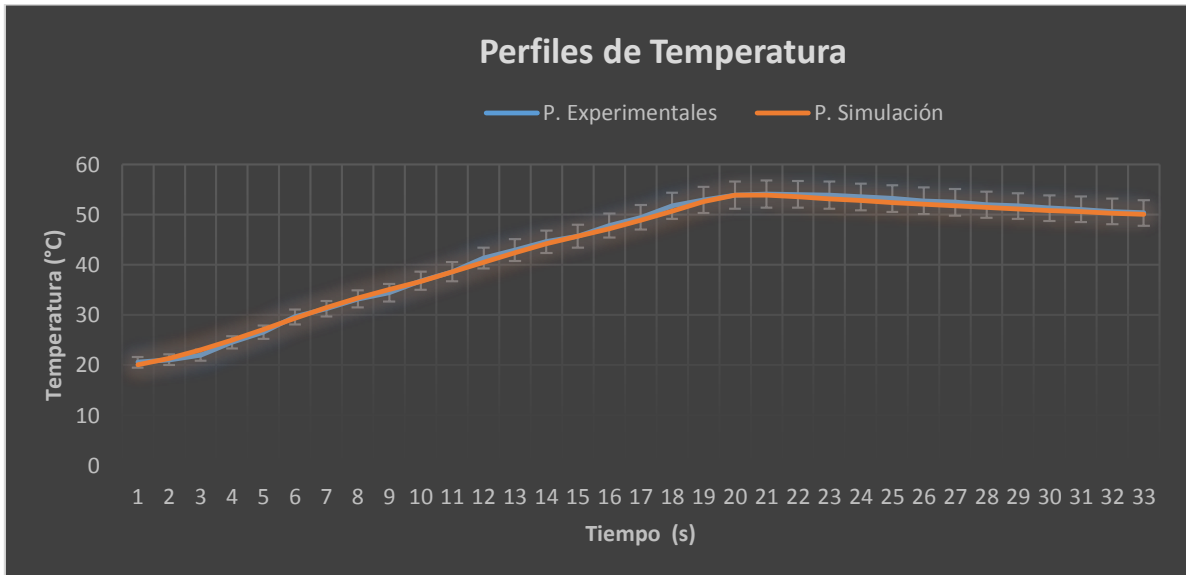


Figura 4.9: Comparación simulación y experimentación transitorios

#### 4.3.3 Conclusiones de la segunda etapa

El objetivo de la segunda etapa de simulación fue encontrar la función de temperatura y flujo de calor en estado transitorio que fuera equivalente a un modelo dinámico del proceso. La función del tiempo la cual respeta las condiciones de temperatura y flujo de calor máximo, tuvieron porcentajes de error mínimos los cual valida esta etapa del proceso y cumplió el segundo objetivo específico del proyecto.

<sup>2</sup> Romero Sergio A. R. 2007. Patente. System for drying a leather finish film using infrared energy. MXGT05000012 (A). Internacional.

#### 4.4 TERCERA ETAPA: PORCENTAJE DE EVAPORACIÓN SIMULACIÓN DE EVAPORACIÓN

En la etapa 1 se mencionó que fue necesario hacer simplificaciones al modelo. Debido a esas simplificaciones, fue necesario analizar de forma independiente el sustrato (Figura 4.10). La malla de la arte de agua contenida en el sustrato también es de tipo cascara mejor conocido como shell ya que es el mejor tipo de elemento para el análisis de volumen finito en los casos que se analizan laminas o cuerpos muy delgados. Este modelo cuenta con 22725 nodos y 19600 elementos de  $\sim 0.03$  mm con calidad de 1 la cual es la mejor calidad posible y fue gracias a que es una geometría muy sencilla de mallar.

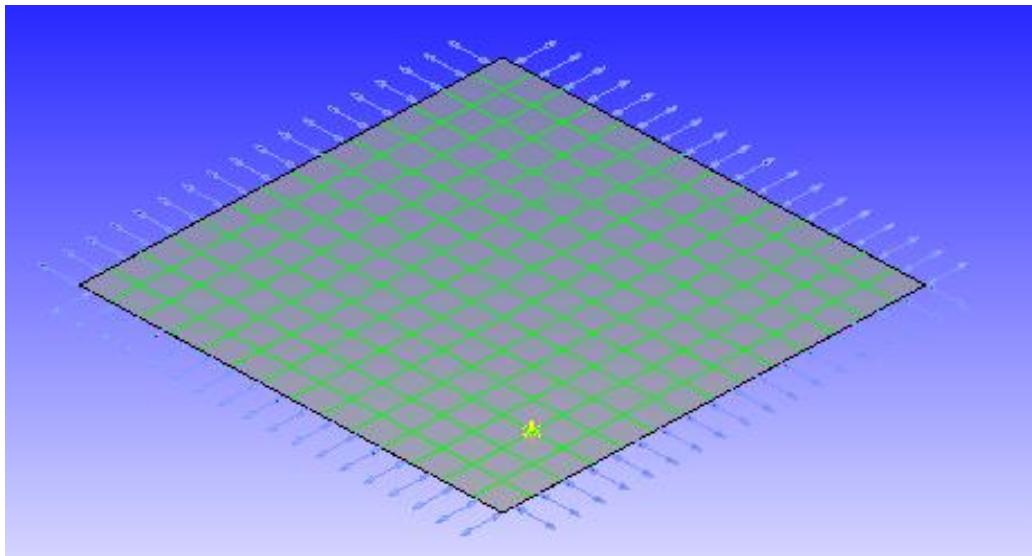


Figura 4. 10: modelo 3D, mallado y condiciones de frontera del sustrato

Recordemos que más importante que simular los perfiles de temperatura es el simular la cantidad de agua contenida en el sustrato que se evapora durante el trayecto en el secador y sus posibles versiones. Para la simulación de la evaporación era indispensable el conocer la temperatura que alcanzaba el sustrato durante el secado lo cual ya se logró en la etapa anterior.

##### 4.4.1 Simulación de los puntos experimentales de validación de la tabla 3.1

Si observamos la tabla 3.1, podemos ver que las condiciones a replicar para esta etapa son: gramaje de la película de sustrato 3.99 y 6.30 gr; velocidad de la banda 7.68 y 15.36 m/min y la separación del sustrato a los paneles es de 20 cm.

Antes de evaporar es necesario conocer los perfiles de temperatura en la superficie del sustrato. Por lo que primero se realizó la simulación con dichas condiciones en un modelo similar al de la etapa 2 para obtener la función de temperatura y flujo de radiación correspondiente. La diferencia entre los puntos experimentales, radica en la variación de gramaje del sustrato, y la velocidad de la banda de transporte del cuero.

Las funciones de temperatura y de radiación fueron ajustadas en todos sus puntos. Recordemos que en los puntos de simulación 2 y 3 la velocidad de la banda de transporte de los cueros es de ~16 m/min. Para obtener las funciones correspondientes de radiación y temperatura se supuso que eran exactamente igual que cuando la velocidad de la banda es ~8 m/min, con la diferencia que con una velocidad cercana a 16 m/min en la banda, el recorrido del cuero dentro del túnel de secado dura aproximadamente la mitad del tiempo que cuando la velocidad es cercana a los 8 m/min. Por lo tanto se recorrieron todos los puntos exactamente a la mitad del tiempo al que se tiene en las funciones obtenidas en la etapa 2.

Las gráficas de las funciones de temperatura y flujo de radiaciones empleadas para simular los puntos de la tabla 3.1 se muestran a continuación en la tabla 4.3.

Tabla 4. 3: Función de temperatura y flujo de radiación puntos tabla 3.1

<b>PUNTOS DE SIMULACIÓN</b>	<b>FUNCIÓN DE TEMPERATURA</b>	<b>FUNCIÓN DE RADIACIÓN</b>
1,4		
2,3		

En la figura 4.11 se muestra el modelo geométrico empleado, el cual es el mismo para cada uno de los puntos ya que la diferencia es únicamente en las funciones de temperatura.

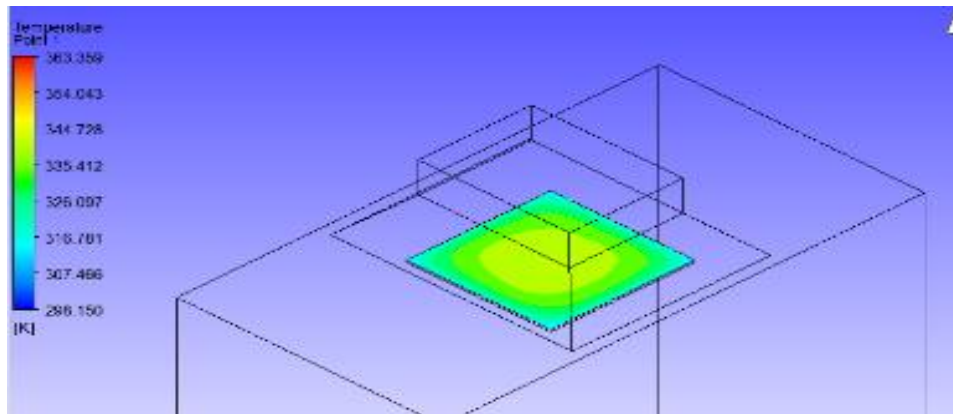


Figura 4.11: Modelo térmico punto 1

Para los modelos de simulación de evaporación en los puntos experimentales 1 y 2 de la tabla 3.1, el volumen de agua empleado dispersado de manera uniforme en la superficie tiene una masa correspondiente a 3.99 gr. Los modelo 3 y 4 de la misma tabla emplearon una geometría para 6.3 gr de masa de agua.

#### 4.4.2 Resultados punto 1 (tabla 3.1)

En la figura 4.12 se muestra el perfil de temperatura obtenido por simulación. En dicha figura se puede observar que el valor de temperatura de salida es de  $\sim 363^{\circ}\text{K}$  o  $90^{\circ}\text{C}$  el cual es muy cercano al valor de  $95^{\circ}\text{C}$  de la tabla 3.1.

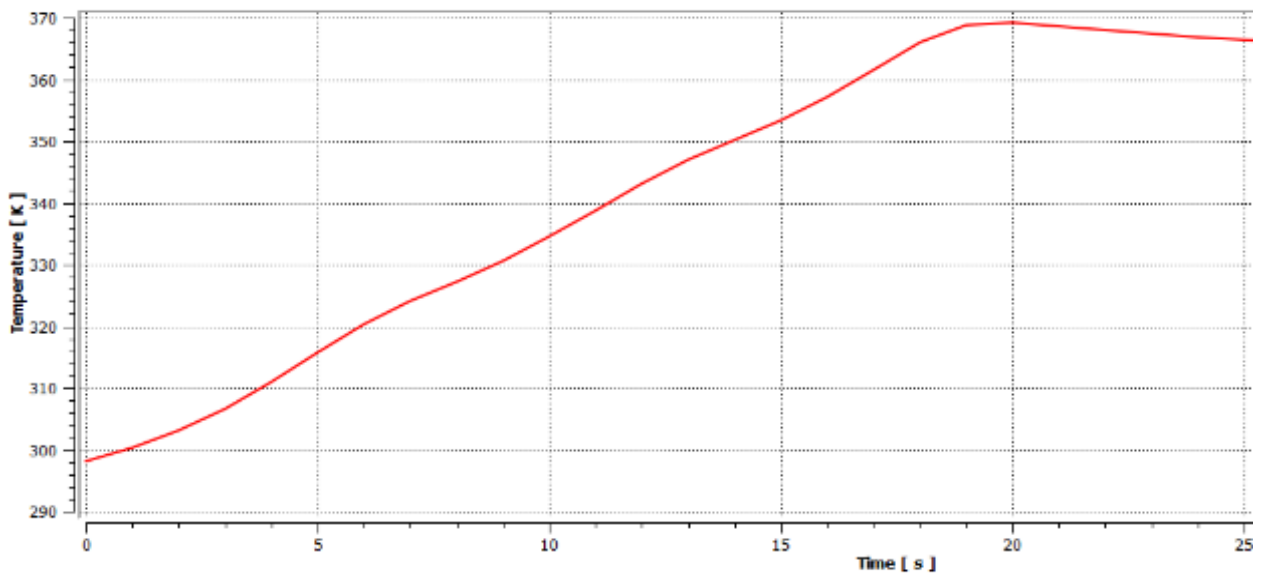


Figura 4. 12: Perfil de temperaturas punto 1

Para el modelo de evaporación se introdujeron como entrada los resultados transitorios obtenidos de la figura 4.12. Se introdujeron las condiciones ambientales y propiedades del material a evaporar (agua). Los resultados del modelo de evaporación se muestran en las figuras 4.13 y 4.14.

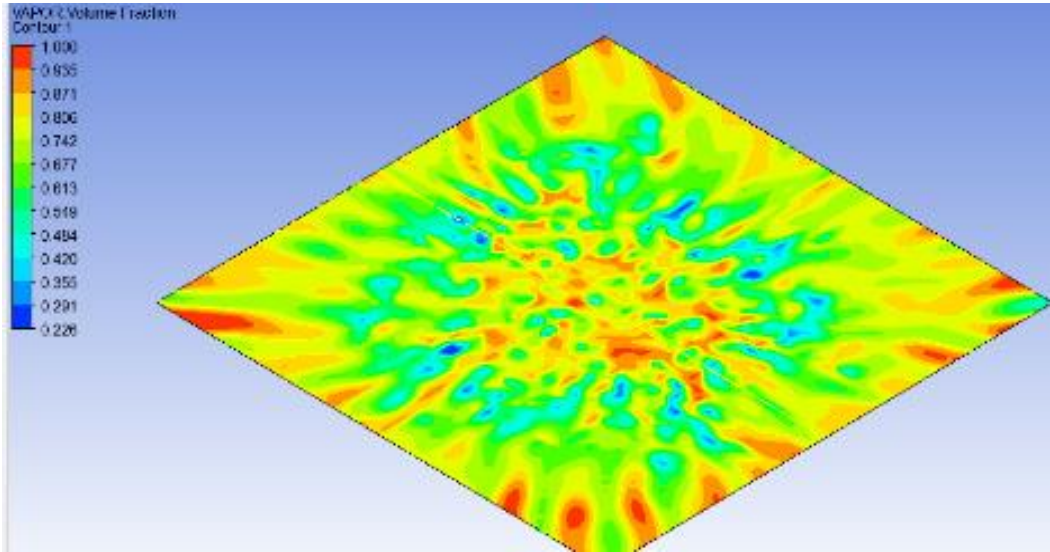


Figura 4. 13: Resultados del modelo de evaporación punto 1

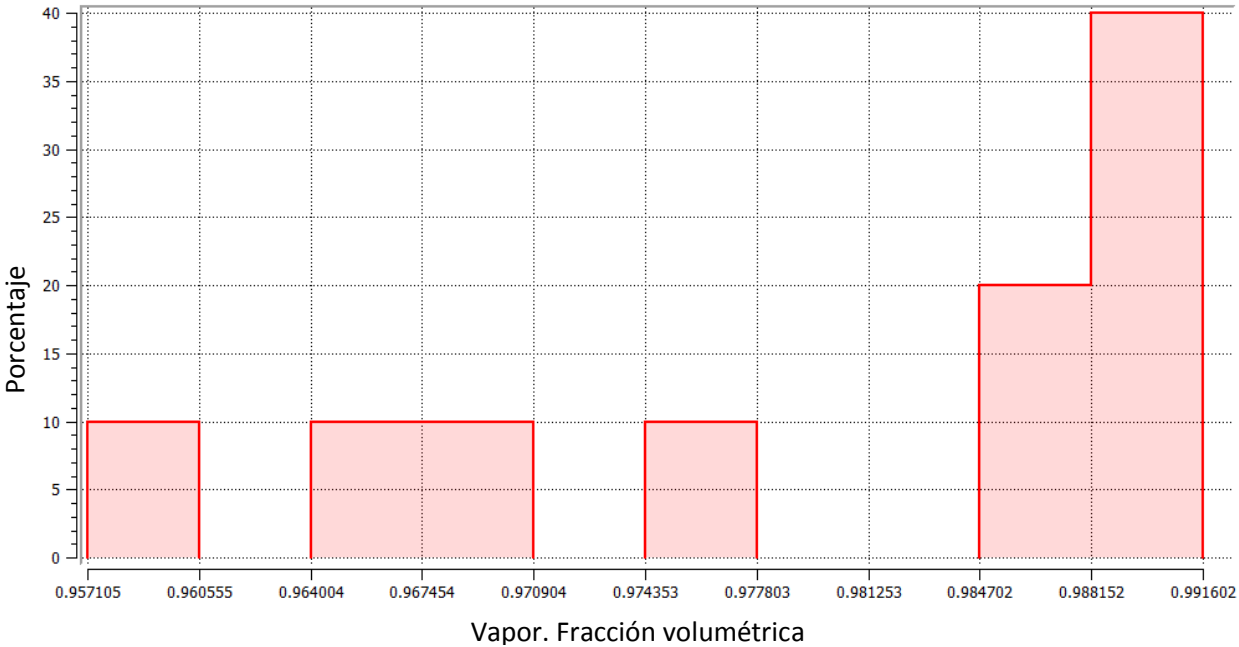


Figura 4. 14: Histograma de evaporación punto 1

En la tabla 4.4 se muestra la suma de las fracciones volumétricas, con la que se obtuvo la cantidad total de masa evaporada de agua de la película de sustrato la cual es ~98%.

Tabla 4. 4: Sumatoria de fracciones volumétricas de vapor

VAPOR. Fracción volumétrica	Porcentaje en el histograma	Total % evaporado
0.957104887	10	9.57104887
0.960554618	0	0
0.964004314	10	9.64004314
0.96745401	10	9.6745401
0.970903707	0	0
0.974353403	10	9.74353403
0.977803099	0	0
0.981252795	0	0
0.984702492	20	19.6940498
0.988152188	40	39.5260875
0.991601919	0	0
	100	97.8493035

Lo que indica la tabla 4.4 es la fracción de vapor resultante después el secado de la película de agua y los porcentajes en los que se encuentran. Por ejemplo, en el primer reglón observamos una fracción de volumen de 0.957 con 10% de presencia en la película de agua, esto quiere decir que se evaporo el 10% de la película de agua en un 95.7 % y que existen otras fracciones del volumen total que se evaporaron hasta en un 98.8%. La suma de esas fracciones nos indica la cantidad de agua evaporada de la película, esto es importante de recordar pues más adelante se muestran muchas grafica de este tipo.

#### 4.4.3 Resultados punto 2 (tabla 3.1)

Para el punto 2 (figura 4.15) se muestra el perfil de temperatura obtenido en la simulación. La temperatura de salida es de ~342°K o 69°C, el valor promedio de la tabla 3.1 para el punto 2 es de 69°C.



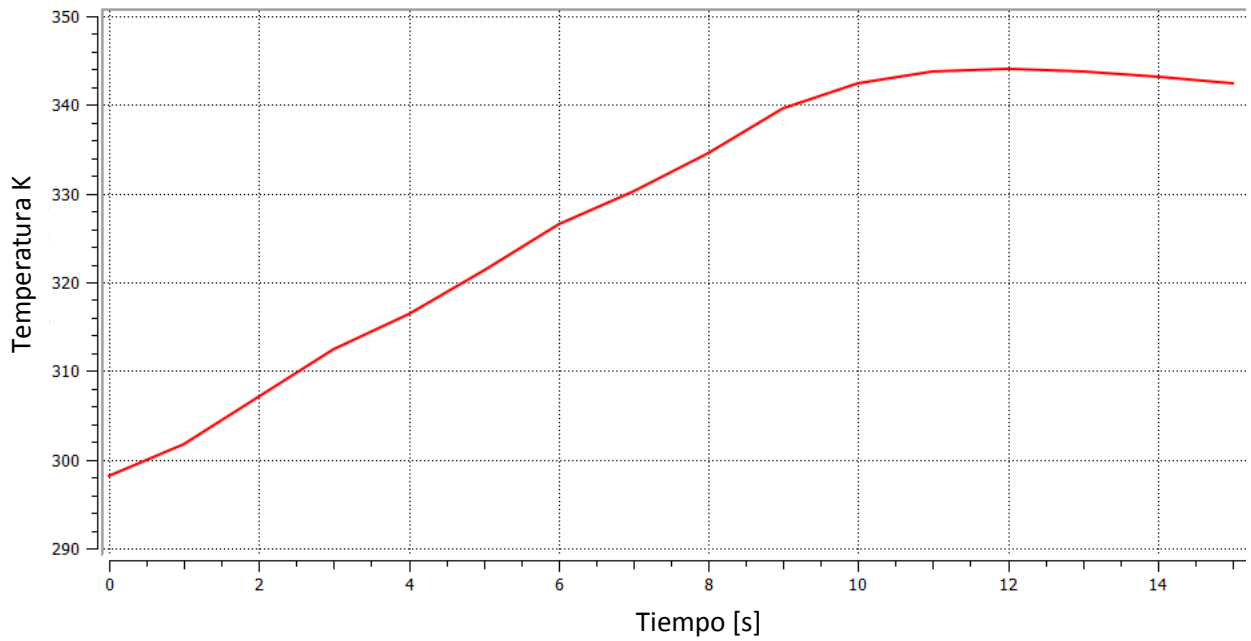


Figura 4. 15: Perfil de temperaturas punto 2

En la figura 4.16 y 4.17 se muestra el perfil e histograma de evaporación, con la que se obtuvo la cantidad total de masa evaporada de sustrato para el punto 2, el cual es del 50%.

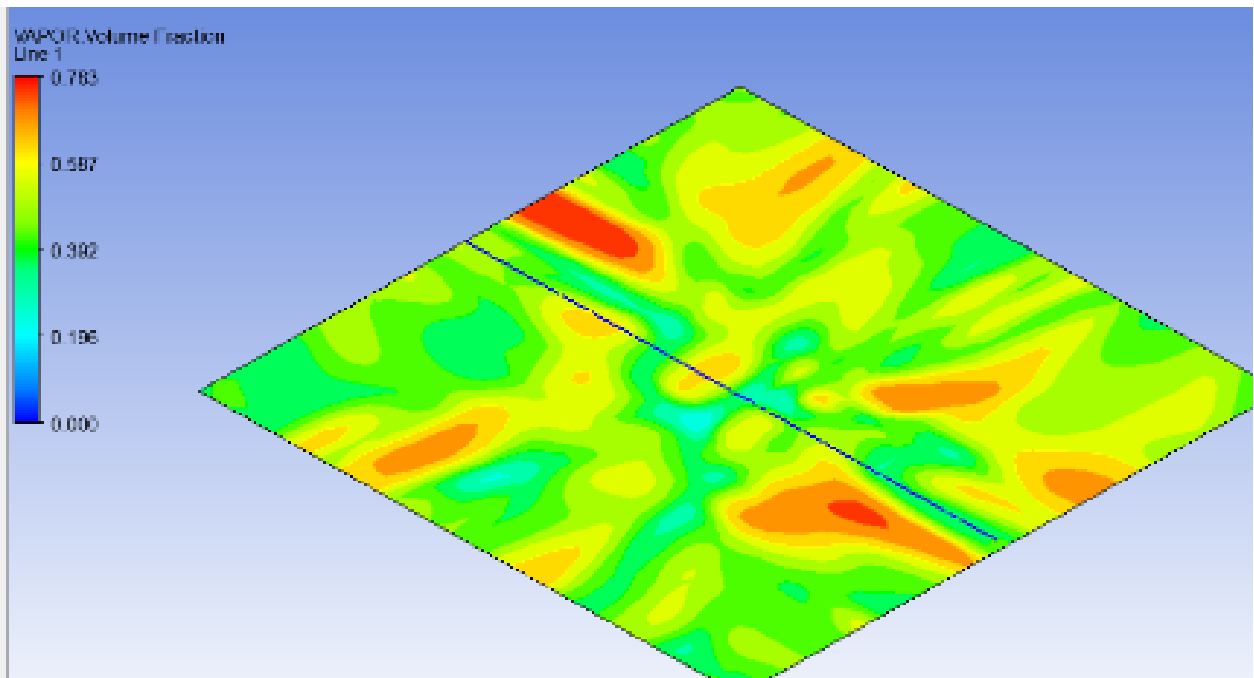


Figura 4. 16: Resultados de modelo de evaporación punto 2

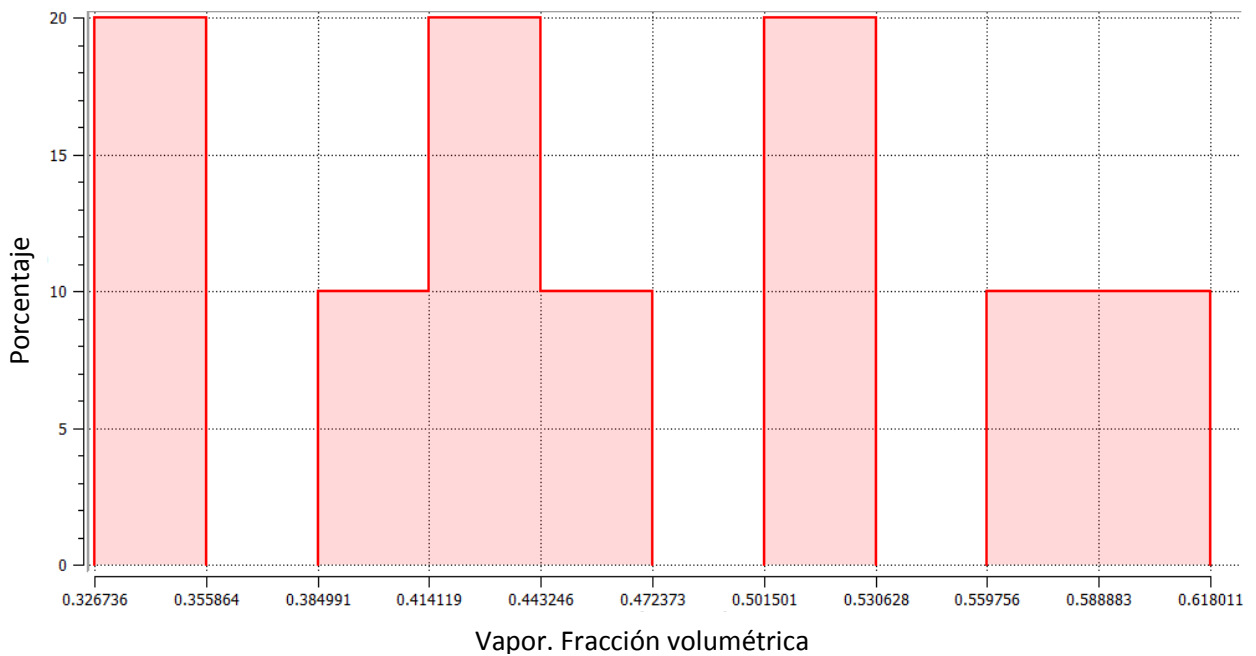


Figura 4. 17: Histograma de evaporación punto 2

#### 4.4.4 Resultados punto 3 (tabla 3.1)

El punto 3 (figura 4.18) muestra el perfil de temperatura obtenido en la simulación. La temperatura de salida es de  $\sim 325^{\circ}\text{K}$  o  $51^{\circ}\text{C}$ , el valor promedio de la tabla 3.1 para este punto es de  $56^{\circ}\text{C}$ .

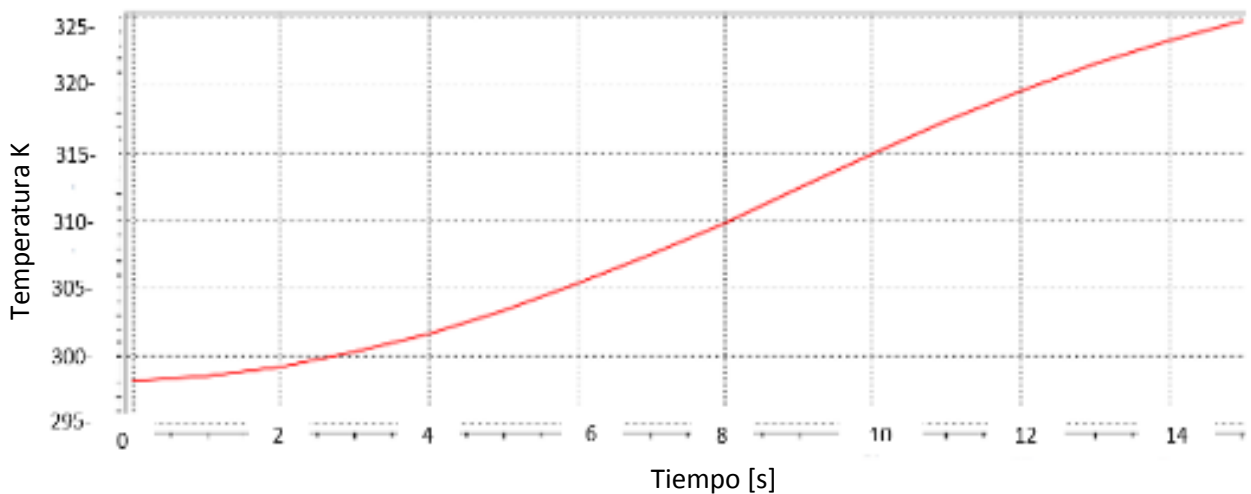


Figura 4.18: Perfil de temperaturas punto 3

En la figura 4.19 se muestra el perfil de evaporación y figura 4.20 se muestra el histograma. El cual sirve para realizar la suma de las fracciones volumétricas, con la que se obtuvo la cantidad total de masa evaporada de sustrato para el punto 3, el cual es del 40%.

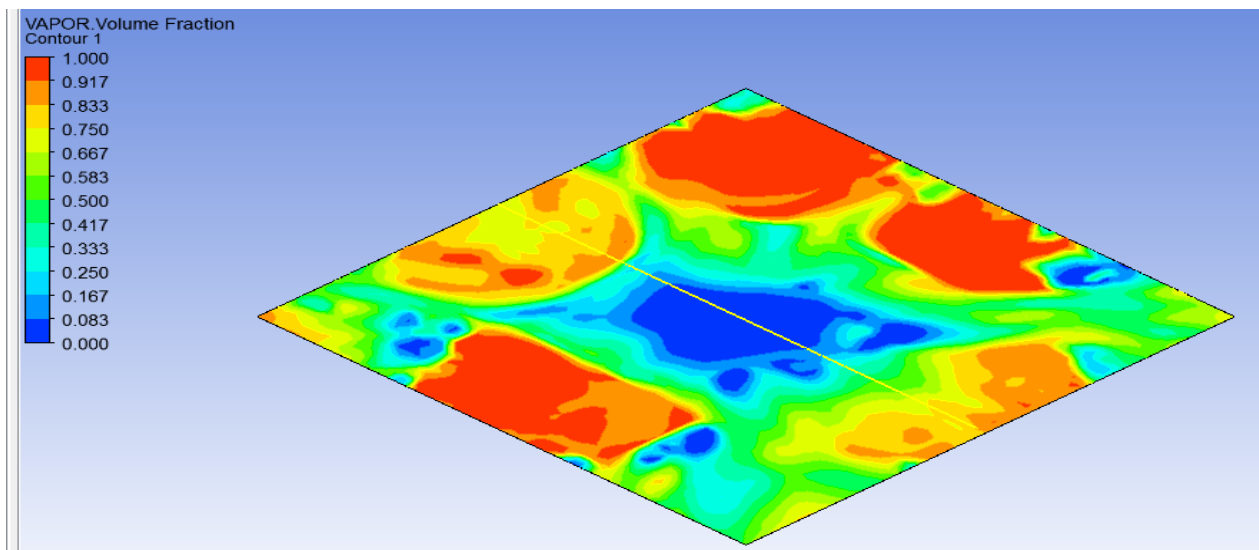


Figura 4. 19: Resultados de modelo de evaporación punto 3

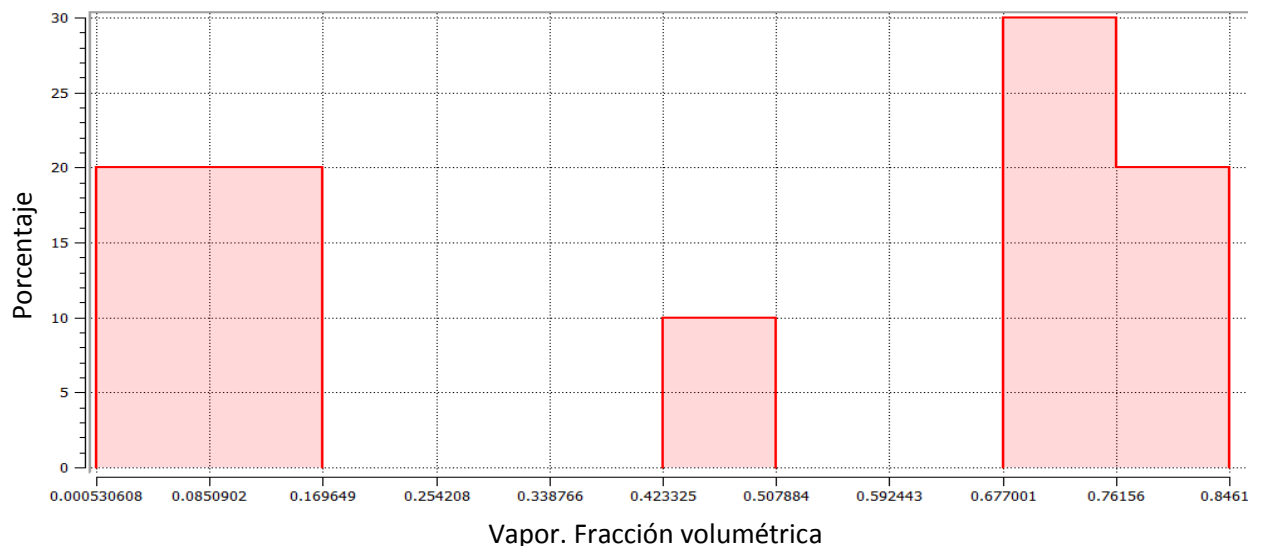


Figura 4. 20: Histograma de evaporación punto 3

#### 4.4.5 Resultados punto 4 (tabla 3.1)

El punto 4 (figura 4.21) muestra el perfil de temperatura obtenido en la simulación. La temperatura de salida es de  $\sim 359^{\circ}\text{K}$  o  $86^{\circ}\text{C}$ , el valor promedio del punto 4 en la tabla 3.1 es de  $86^{\circ}\text{C}$ .

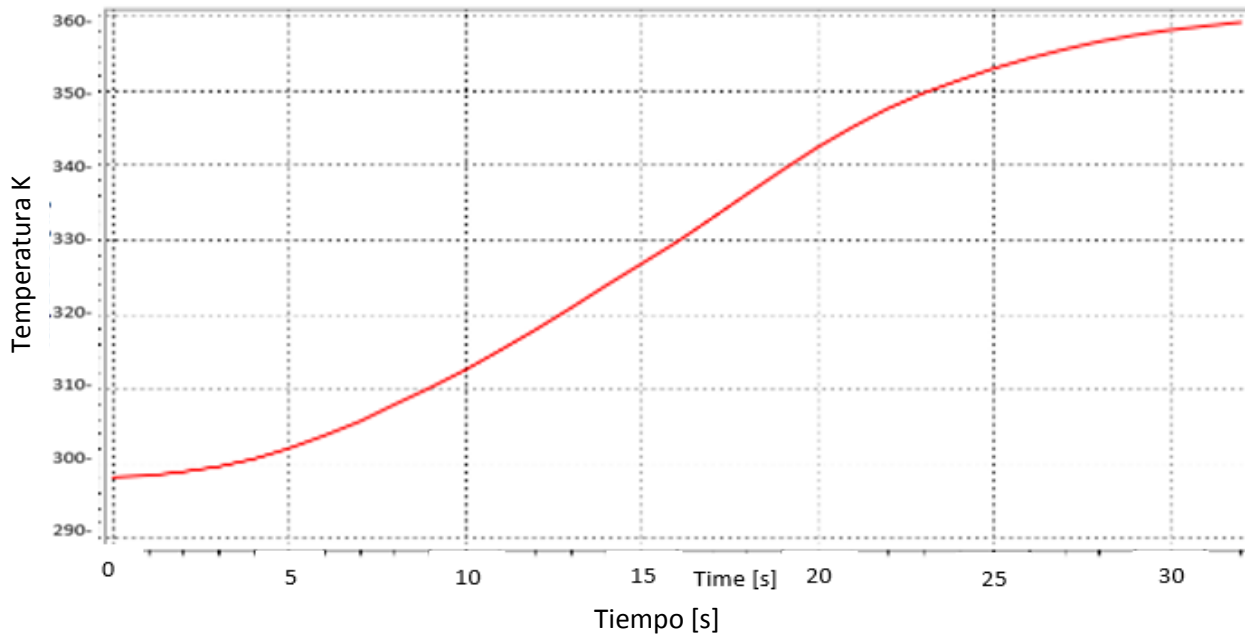


Figura 4. 21: Perfil de temperaturas punto 4

En la figura 4.22 se muestra el perfil de evaporación, el cual es del 66%.

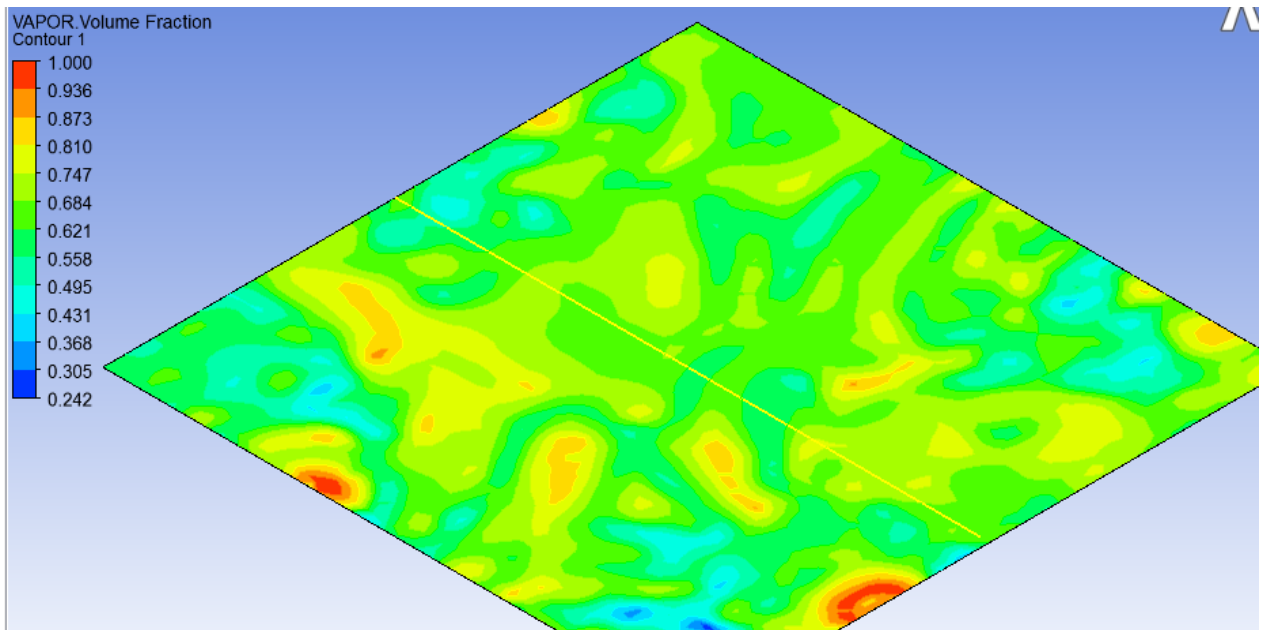


Figura 4. 22: Resultados de modelo de evaporación punto 4

En la figura 4.23 se muestra el histograma de evaporación.

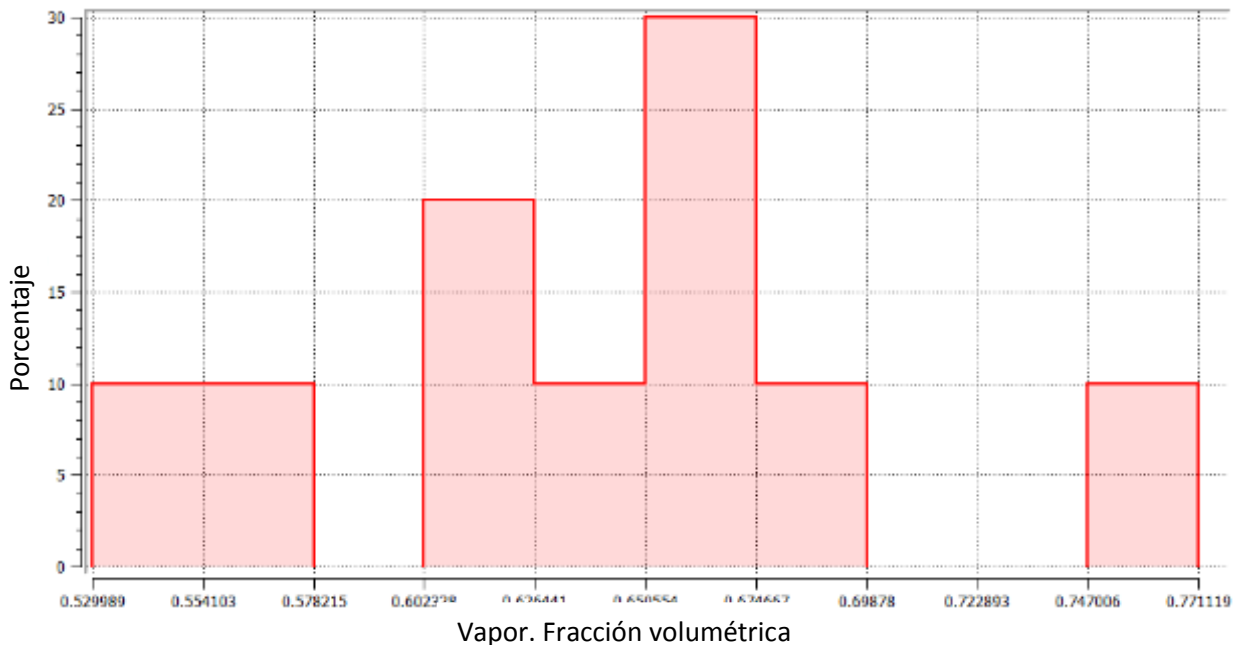


Figura 4. 23: Histograma de evaporación punto 4

#### 4.4.6 Validación de la etapa 3

Para validar esta etapa del proyecto, se mencionó en el capítulo 3 que se hace uso de la tabla 3.1 como punto de comparación. A continuación se muestran en la tabla 4.5 los resultados de la simulación de los cuatro puntos a evaluar, junto con su porcentaje de error respecto a los resultados experimentales.

Tabla 4.5: Comparación de resultados de simulación y experimentales.

PUNTO	TS <sup>3</sup> -EX <sup>4</sup> [°C]	TS-SIM <sup>5</sup> [°C]	% ERROR	%EVAP <sup>6</sup> -EX	%EVAP-SIM	% ERROR
1	95	90	5.2	105	97	7
2	69	69	~0	51	50	1
3	56	51	8.9	36	40	4
4	86	86	~0	72	66	6

Como se observa en la tabla la temperatura de salida y los porcentajes de evaporación tienen un porcentaje de errores muy bajos, lo cual indican que las simulaciones son

<sup>3</sup> TS: temperatura de salida

<sup>4</sup> EX: por experimentación

<sup>5</sup> SIM: por simulación

<sup>6</sup> EVA: evaporación

correctas. En la parte de evaporación la simulación de los puntos 2 y 3 son muy cercanas a los resultados experimentales. Los puntos 1 y 4 están un poco alejado de lo deseable pero los resultados son aceptables. Por lo tanto el modelo de evaporación predice satisfactoriamente el porcentaje de evaporación.

#### 4.5 CUARTA ETAPA: SELECCIÓN DEL MODELO ESCALABLE

Para la selección del tipo o tipos de paneles a emplear en el diseño se tomaron las siguientes consideraciones:

Existen tres diferentes tamaños de paneles los cuales se puede observar en la figura 4.24. Estos paneles solo cambian en la longitud B, y el ancho permanece igual para cualquiera. La longitud a cubrir del secador de manera continua es mínimo de 3 m ya que recordemos que en la industria automotriz esa es la medida promedio de los cueros enteros y en la industria del calzado la medida es ~1.80 m pero el trabajo presente evalúa para la industria automotriz ya que es la que en un futuro podría invertir en el equipo de secado. La cantidad de paneles en los modelos y su costo energético son los factores influyentes en la selección del tipo de panel.

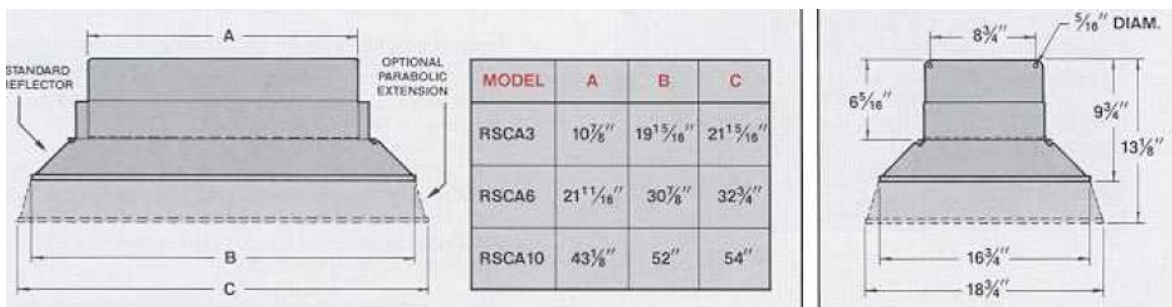


Figura 4.24: Tipo y medidas de los paneles infrarrojos comerciales<sup>7</sup>

Para hacer el cálculo de los consumos energéticos, se requiere saber el tipo de panel y la cantidad. La tabla 4.6 muestra el consumo energético para los diferentes tipos de panel. Como se puede observar existen variedades en los modelos por su tipo de combustible y tipo de encendido, sin embargo no es significativo para la simulación.

<sup>7</sup> (ceramic-heater\_rscaseries\_overview pág.1)

Tabla 4.6: Consumo energético de los paneles infrarrojos comerciales<sup>8</sup>

MODELO	TIPO DE GAS	CONSUMO ENERGETICO (BTU/HR)
RSCA3-L1	LP	26,000
RSCA6-L1	LP	52,000
RSCA10-L1	LP	104,000

#### 4.5.1 Propuestas de escalamiento

Para definir el nuevo prototipo de equipo de secado infrarrojo, se propusieron 6 configuraciones diferentes con 2 variables independientes. Como se mencionó en el capítulo 3, estas variables independientes son: la velocidad de la banda de transporte (7.68, 15.6 m/min), y la distancia entre el panel y el sustrato (20 y 32 cm). Se emplearon esos niveles para las variables mencionadas, debido a que ya se habían utilizado con buenos resultados en equipo de secado previamente.

Para realizar la simulación de los nuevos diseños, se trabajó de la misma manera que en la etapa 2 y posteriormente como la etapa 3. Primero se hizo un modelo geométrico representativo (figura 4.25). La malla del modelo es de tipo hexaédrica se cuenta con 58333 nodos y 17417 elementos de ~0.03 mm con calidad de elementos 0.8. Posteriormente se simulan los modelos para generar los perfiles térmicos de cada nuevo diseño.

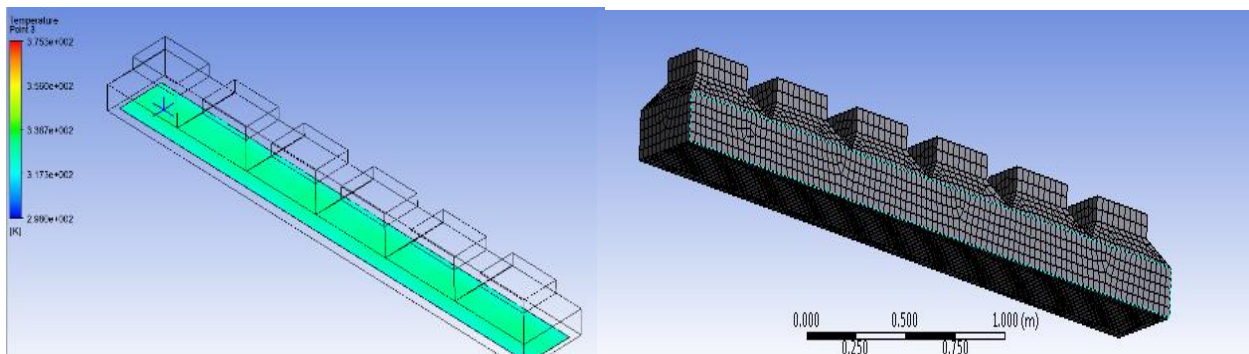


Figura 4.25: Ejemplo de modelo geométrico escalado

<sup>8</sup> (ceramic-heater\_rscaseries\_overview pág. 2)

Con los perfiles térmicos obtenidos se introducen en el modelo de evaporación, y se obtienen las fracciones volumétricas de evaporación para cada caso, el modelo geométrico empleado para el agua a evaporar se muestra en la figura 4.26.

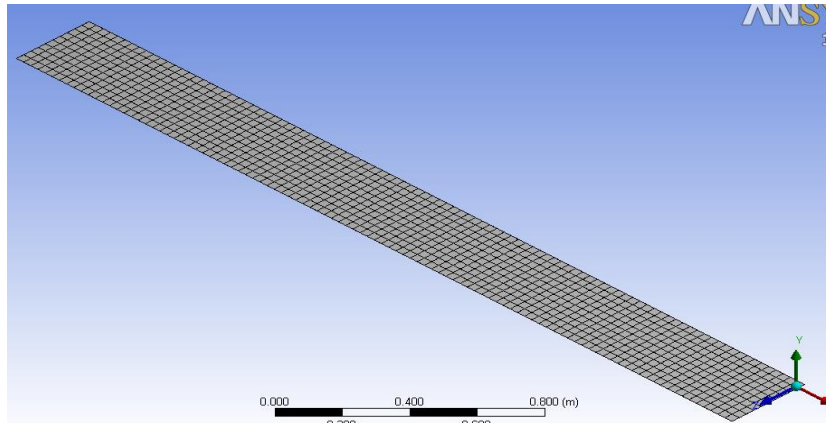


Figura 4.26: Malla del modelo geométrico de capa de agua a evaporar en cuero 3 metro de largo

La malla de este modelo es de tipo cascara como en la etapa 3, cuenta con 12221 nodos y 10000 elementos de  $\sim 0.02$  mm con calidad 1. Como son varios modelos simulados, en este capítulo mostramos únicamente el modelo que resulto más eficiente para evaporar el 100% del sustrato y por lo tanto es el nuevo modelo prototipo escalado. En la tabla 4.6, se observan los resultados de cada uno de los modelos evaluados.

Tabla 4.7: Resultados de simulación de modelos escalables propuestos

MODELO	%E <sup>10</sup> -V8 <sup>11</sup> -320 <sup>12</sup>	%E-V16 <sup>13</sup> -320	%E-V8-200 <sup>14</sup>	%E-V16-200	BTU/HR
1	95%	79%	93%	92%	468000
2	97%	82%	98%	97%	624000
3	96.5%	82%	98%	98%	780000
4	95%	89%	96%	89%	364000
5	95%	77%	97%	90%	546000
6	94%	80%	96.5%	88%	910000

<sup>10</sup> %E: porcentaje de evaporación del sustrato

<sup>11</sup> V8: velocidad de la banda 8m/min

<sup>12</sup> 320: separación del panel al sustrato mm

<sup>13</sup> V16: velocidad de la banda 16m/min

<sup>14</sup> 200: separación del panel al sustrato mm



El modelo geométrico número 4 en su configuración con separación del sustrato al panel de 200 mm y una velocidad de 8m/min, resulto ser el modelo más eficiente para evaporar ~100% del sustrato. Cabe mencionar que ningún modelo marco 100% de evaporación. Sin embargo los modelos que muestran evaporación mayor o igual al 95%, se consideraron como si fuera el 100% de evaporación del sustrato. Esto es debido a que en el modelo de simulación el sustrato es estático lo que significa que no pasa debajo de una serie de paneles. Recordemos que para eso se hizo una función equivalente que simule el transporte durante el secado, por lo que existen zonas que no se evapora completamente. Sin embargo es un error aceptable debido a las simplificaciones realizadas al modelo de simulación.

#### 4.5.2 Modelo virtual prototipo escalable

Las dimensiones generales del modelo geométrico prototipo para escalado son: 3.3 metros de ancho, y 4 metros de largo. También consta de 2 filas unidas de 7 quemadores modelo A. Los quemadores se encuentran orientados con el ancho hacia la entrada y la longitud B a lo largo del túnel de secado. Dentro del túnel y alrededor de los quemadores se encuentran los escudos de reflexión del mismo material que se utilizó en el prototipo de laboratorio. La separación del panel al sustrato es de 200 mm y la velocidad de la banda de 8 m/min, en la figura 4.27 se muestra el modelo geométrico escalable.

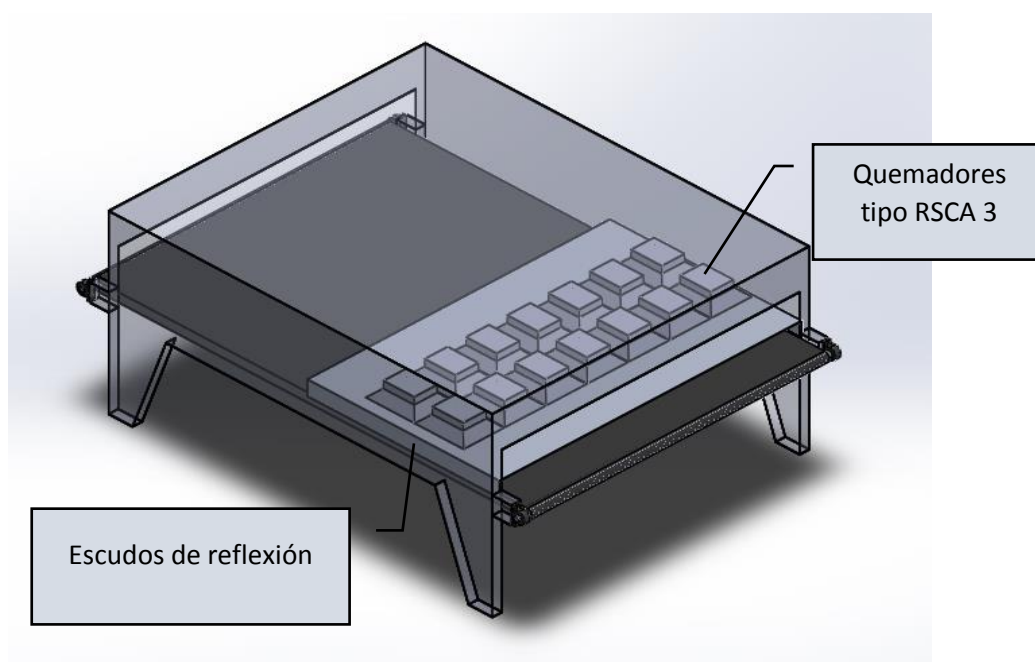


Figura 4.27: Modelo geométrico escalable

### 4.5.3 Resultados de los perfiles térmicos del modelo escalable

Como ya se mencionó se siguió el mismo método empleado en las fases 2 y 3 del proyecto. La simulación nos muestra que se espera que la superficie del sustrato alcance una temperatura máxima de 75°C, y que al salir del equipo de secado se encuentre a 73°C. En la figura 4.28 se muestran los perfiles térmicos en estado transitorio sobre la superficie del sustrato resultantes de la simulación térmica.

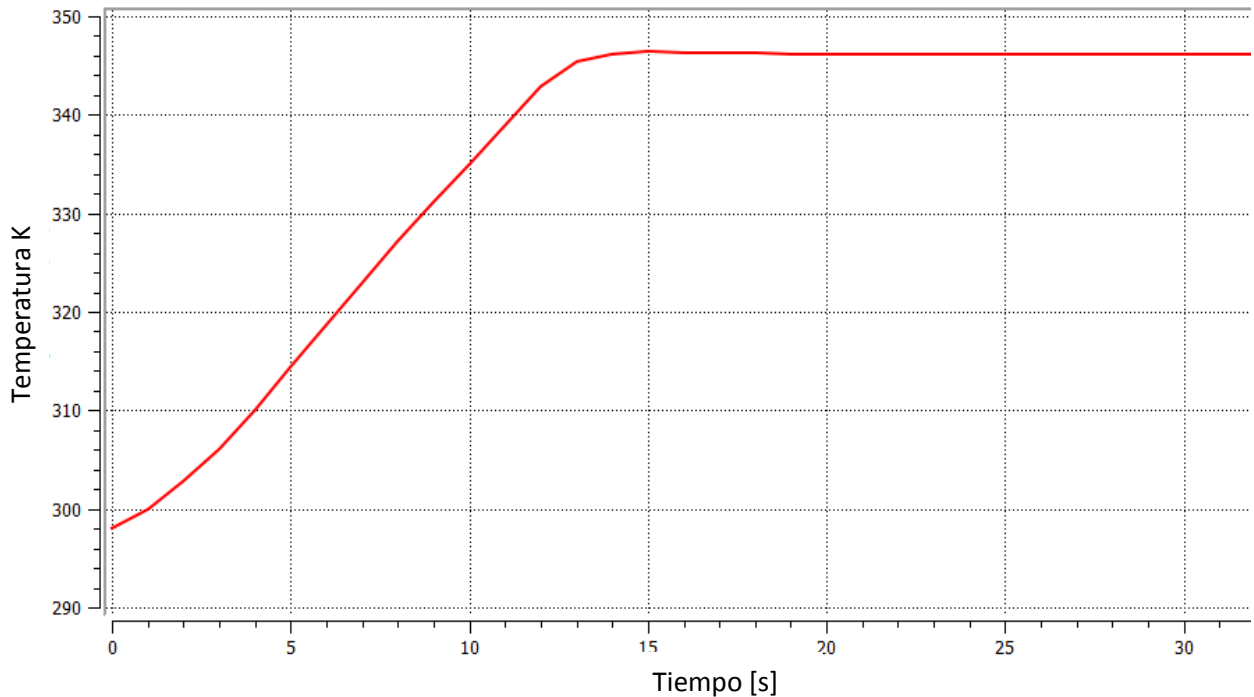


Figura 4.28: Perfiles térmicos en superficie de sustrato (modelo escalable)

Los perfiles térmicos se emplearon como variables transitorias de entrada al modelo de evaporación. A continuación se muestra los resultados del modelo de evaporación (figuras 4.29 y 4.30).

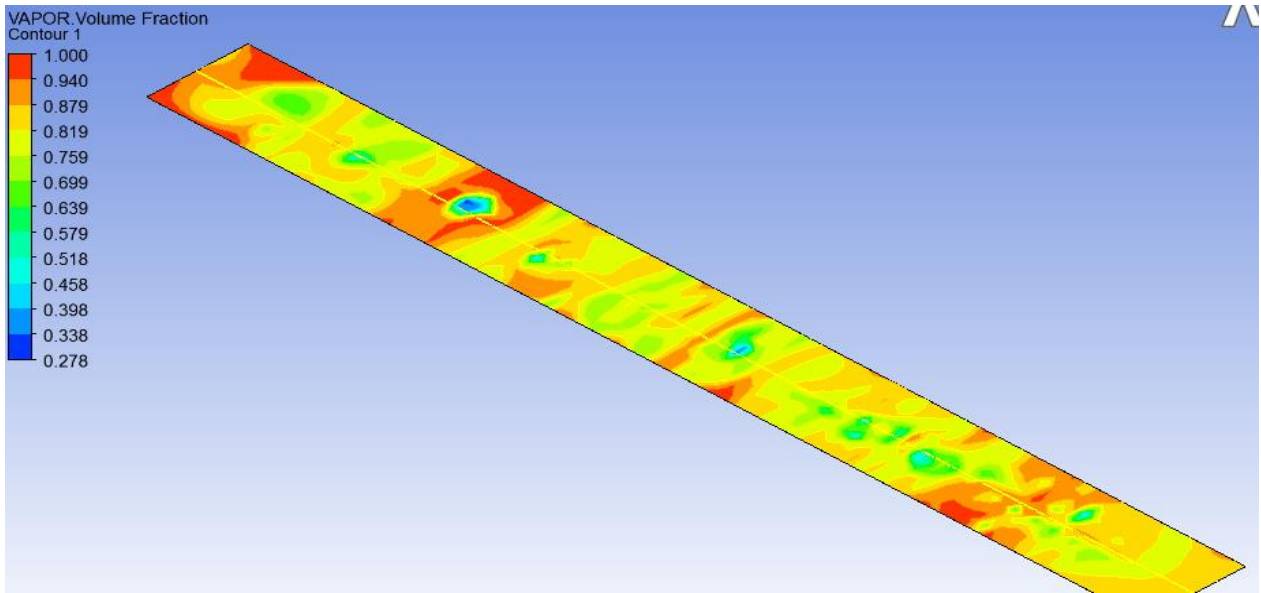


Figura 4.29: Resultados de simulación de evaporación (modelo escalable)

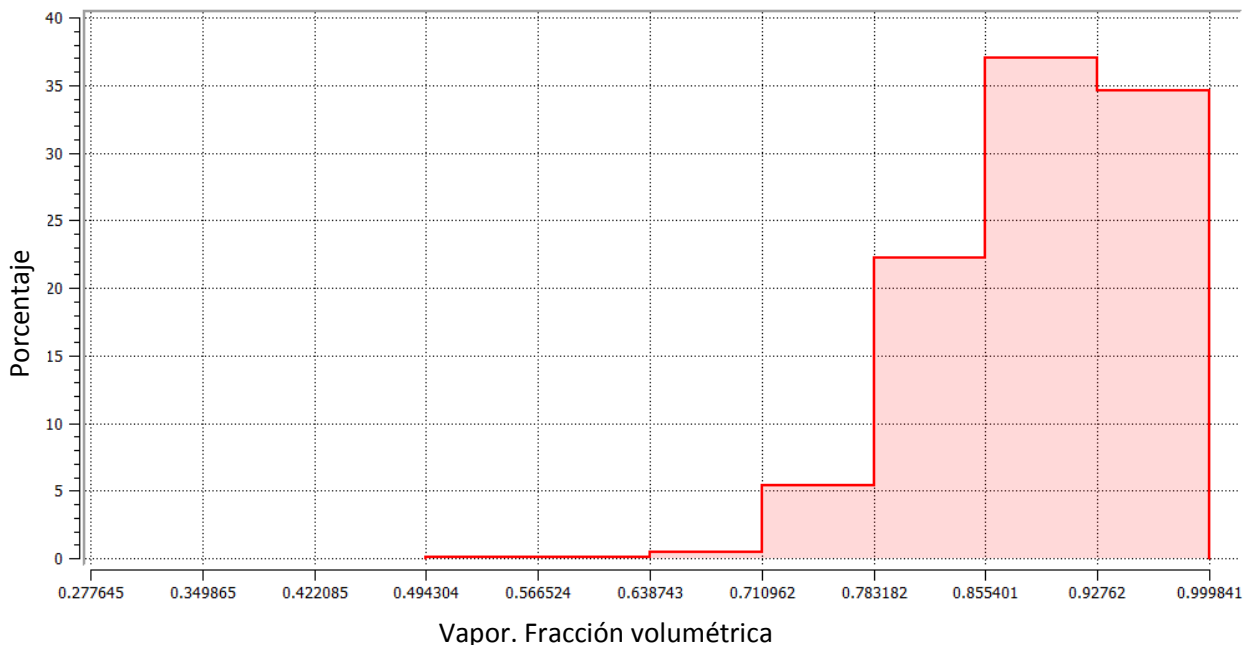


Figura 4.30: Histograma de evaporación modelo final escalable

El porcentaje promedio de evaporación del sustrato fue de 96% que como mencionamos se considera como si fuera el 100% de evaporación del sustrato, y su consumo energético es 364000 BTU/HR. Utilizando las formulas de la tabla del anexo B:

$$1 \text{ lt gas LP} = 0.54 \text{ kg/lt}$$

Sí

$$1 \text{ lt gas LP} = 25,200 \text{ btu/lt}$$

Entonces

$$364000 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \sim 14.5 \text{ lt/hr gas LP}$$

El costo por kg de gas LP es de \$14.14 M.X.N entonces por hora de producción el gasto de gas sería ~ \$205 y por costo de producción en un turno de 8 horas \$1640 por día. Por la velocidad de la banda, en un turno de 8 horas se estiman ~900 secados de  $10 \text{ gr /ft}^2$  de sustrato.

## CONCLUSIONES

En la investigación expuesta se evaluó, y rediseñó un prototipo para el secado por infrarrojo a gas para el acabado del cuero. El método empleado fue volumen finito y se usó un software de simulación numérica de elementos finitos (ANSYS CFX) para resolver las ecuaciones de transferencia de calor y transporte masa. La hipótesis planteada no se rechazó, es decir, se obtuvo un nuevo modelo geométrico de equipo de secado para medidas de cueros enteros automotrices. El modelo escalable tiene las condiciones de frontera representativas del proceso con las que predice con un bajo porcentaje de error el comportamiento de la temperatura y el porcentaje de evaporación del sustrato durante el trayecto de secado. Dichas variables son las de interés en el proceso del acabado del cuero.

Existen varias maneras de escalar un prototipo de laboratorio, una manera muy frecuentemente usada es por semejanza geométrica en la que solamente se amplían las dimensiones de manera proporcional a una o más variables geométricas. Ese método se pudo emplear para escalar el equipo de secado de manera muy sencilla, mas sin embargo se hubiera perdido el ahorro energético y por su puesto económico que el modelo escalable resultante ofrece. Además de la gran cantidad de aplicaciones en la industria del curtido que van más allá del modelo escalable resultante. Por ejemplo si se desea aumentar o disminuir la cantidad de sustrato por aplicación, se puede predecir si se evaporaría completamente el sustrato o si se está trabajando a una temperatura adecuada que no provoque daños al cuero. Con esto no se pierde tiempo de producción realizando o ajustando el equipo mediante prueba y error, incluso se podrían realizar análisis estadísticos en base a diseños de experimento por simulación para mejorar el proceso y o el diseño de este tipo de equipos industriales.

## RECOMENDACIONES

Apoyándose en la experiencia obtenida al llevar a cabo este proyecto de tesis se recomienda lo siguiente:

- La simplificación de los modelos de simulación de manera general es una técnica ampliamente usada para simplificar los cálculos, y en cuestiones de simulación por volumen finito no es la excepción pues al ser menos información para procesar se ahorra los recursos computacionales y agilizan los resultados. Mas sin embargo aun cuando fue una manera sencilla y relativamente fácil de realizar las simulaciones térmicas, debido a las simplificaciones mencionadas. Recomiendo que sí se posee los recursos en hardware y software se realice una simulación completa y con movimiento del cuero dentro del túnel. Pues sería interesante ver y comparar los resultados entre simulaciones.
- Otra recomendación para trabajos futuros es el planteamiento de un diseño de experimento que juegue con las variables mencionadas anteriormente. Este diseño de experimentos sin duda arrojaría un nuevo modelo más eficiente.

## BIBLIOGRAFÍA

Matz, A.; Krawiecki. (1978). Editado por Radnoti, Laszlo; Acs. Congr. Leather Ind. 6th, 1, 293-6. La influencia de la humedad contenida en el cuero para la absorción de radiación infrarroja (1.2-2.45  $\mu\text{m}$ ).

Deribere, Maurice. (1944). Revista técnica industrial, 37, 31-2. Drying of leather substitutes with the help of infrared light

Cengel and Yunus A., Heat Transfer: A Practical Approach. 2nd edition, Chap. 1, 11 and 12, mcgraw-Hill, New York, (2003)

R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. 2nd edition, Chap. 16. Limusa wiley, Mexico, (2006)

Aquiles Martínez R, Roger J. Carrillo Castellanos (Comp.) Tomo II (2004) (S. Pérez, Normand Thérien, R.Dhib y A.D.Broadbent) Modelaje del proceso de secado en continuo de textiles mediante un horno a infrarrojo. Páginas 146-150

Kelton, W.D., Law A.M., (1991). Simulation Modeling & Analysis. Second Edition. Mcgraw-Hill, New York.

Chang, P.-C., & Hwang, S.-J. (2006). Simulation of infrared rapid surface heating for injection molding. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(21-22), 3846–3854

Sánchez, A, J.; Alonso, S.; Zitzumbo Guzmán R.; Ornelas Rodríguez F.J. (2006) CIATEC A.C., Omega 201, fraccionamiento industrial Delta, C. P. (37545), León Gto. México. Infrared drying : a leather finishing application

Sánchez, A, J.; Alonso, s.; Zitzumbo guzmán r.; Ornelas rodríguez f.j. (2007) CIATEC a.c., omega 201, fraccionamiento industrial delta, c. P. (37545), león Gto. México. Improvements for infrared drying : a leather finishing application

Anderson, D., Warkentin, a., & Bauer, R. (2008). Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. Journal of Materials Processing Technology, 204(1-3), 269–278. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.080

Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Jun, S., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2008). Infrared Heating in Food Processing : An Overview.

Dhall, A., Datta, A. K., & Torrance, K. E. (2009). Radiative Heat Exchange Modeling Inside an Oven, 55(9). Doi:10.1002/aic

Allanic, N., Rochelle, D. La, & Cre, A. M. (2009). Estimation of an Effective Water Diffusion Coefficient During Infrared-Convective Drying of a Polymer Solution, 55(9), 2345–2355. Doi:10.1002/aic

Thibeault, F., Marceau, D., Younsi, R., & Kocaefer, D. (2010). Numerical and experimental validation of thermo-hygro-mechanical behaviour of wood during drying process. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(7), 756–760. Doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.04.005

Salinas, C., Chávez, C., Gatica, Y., & Ananias, R. (2011). Conventional wood drying simulation using Simulación del secado convencional de madera usando CVFEM, 34(1), 57–65.

Domnick, J., Gruseck, D., Pulli, K., Scheibe, a., Ye, Q., & Brinckmann, F. (2011). Investigations of the drying process of a water based paint film for automotive applications. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(5-6), 495–502. Doi:10.1016/j.cep.2010.08.021

Rebollo, Daniel de Jesús; Bocca, José Carlos; rodríguez, Carlos agosto (2012). Aplicación del método de los volúmenes finitos al cálculo de los factores de vista en cavidades bidimensionales. Universidad nacional de san juan, facultad de ingeniería, departamento de electromecánica. Avenida libertador san Martín (oeste) 1109 - cpa: j5400arl - san juan - argentina.

Jesús M. Nieto, Jons A. Sánchez, Manuel R. Carbajal and Héctor I. Castañeda (2012). Design of radiation shields for infrared heaters. *Diseño de escudos de radiación para secadores infrarrojos*, 35(3), 279–283.

Amiri Chayjan, R., Bahrabad, S. M. T., & Rahimi Sardari, F. (2013). Modeling Infrared-Covective Drying of Pistachio Nuts under Fixed and Fluidized Bed Conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, n/a–n/a. Doi:10.1111/jfpp.12083

Salazar, Juan Carlos, Baena Zapata, Armando (2009). Análisis y diseño de experimentos aplicados a estudios de simulación, issn 0012-7353



## **PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS**

Cica, “Ingreso de Cueros Crudos”, FLASH, <http://www.cica.org.ar/procesoproductivo.swf>  
10/07/2013

Cueronet, “Produzca un mejor acabado del cuero”,  
[http://www.cueronet.com/tecnica/mejoracabado\\_stahl.htm](http://www.cueronet.com/tecnica/mejoracabado_stahl.htm)  
10/07/2013

Cueronet, “flujograma de curtiembre”, <http://www.cueronet.com/flujograma>  
10/07/2013

Guillermo Pérez. “Espectrometría infrarroja”,  
[http://www.espectrometria.com/espectrometra\\_infrarroja](http://www.espectrometria.com/espectrometra_infrarroja)  
05/08/2013

Mor Electric Heating Assoc., Inc. “Página Manual Técnica 12 De los Emisores Infrarrojos De cerámica De Salamander”, <http://www.infraredheaters.com/manual12.htm>  
05/08/2013

# APENDICE A

## PROPIEDADES DEL GAS L.P. GPIT

### GAS L.P. (90% PROPANO "C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>" - 10% BUTANO "C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>")

#### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Densidad relativa del gas l.p. vaporizado con respecto al aire 1.5  
1 lt gas l.p. = 0.5376 kg/lt (factor usado por distribuidores = 0.54)  
1 lt gas l.p. liquido ocupa 273 veces su volumen vaporizado  
3.66 lts de l.p. liquido = 1 m<sup>3</sup> de l.p. vaporizado  
m<sup>3</sup> gas l.p. vaporizado X 2.6 = m<sup>3</sup> de gas natural

Eficiencia de combustión en un quemador carburado de 89 a 96%  
1 lt gas l.p. liquido = 0.273 m<sup>3</sup> gas l.p. vaporizado  
Gasto de orificios y espreas en natural al usarse con l.p. X 0.6763  
La pres. de ap. atm. con nat. a uso con l.p. se disminuye / 23 y 54%  
ft<sup>3</sup> gas l.p. vaporizado X 2.6 = ft<sup>3</sup> de gas natural

#### CAPACIDAD CALORÍFICA

1lt gas l.p. liquido = 25,200 btu/lt X 3.66 lts/m<sup>3</sup> = 92,200 btu/m<sup>3</sup>  
1 m<sup>3</sup> gas l.p. vaporizado = 92,300 btu/m<sup>3</sup>

1 ft<sup>3</sup> gas l.p. vaporizado = 2,600 btu/ft<sup>3</sup>

Por cada caballo caldera (HP boiler) se necesitan: Entre 0.42 y 0.48 mt<sup>3</sup>/hr de gas l.p. = entre 39,000 y 44,400 btu/hr

#### CAPACIDAD DE VAPORIZACIÓN DE TANQUES

D x L x T x C = vaporización en btu/hr donde:

D = diam. en plg.

T = constante de temperatura: a 5°C = 3 a 10°C =4

L = largo en plg.

C = constante de llenado: al 20% = 60

## APENDICE B

### EMISIVIDADES NORMALES DE METALES Y NO METALES

<i>METALES</i>	Estado superficie	Temperatura (°C)	Emisividad	<i>NO METALES</i>	Estado superficie	Temperatura (°C)	Emisividad
Aluminio	placa pulida	25	0,040	Amianto	en cartón	37	0,960
Aluminio	placa pulida	200-600	0,038-0,06	Amianto	en papel	37	0,930
Aluminio	oxidado	100-500	0,20-0,33	Ladrillo	magnesita refractar	1000	0,380
Aluminio	placa mate	25	0,070	Ladrillo	rojo, rugoso	20	0,930
Antimonio	pulido	37-260	0,28-0,31	Ladrillo	gris, satinado	1100	0,750
Latón	oxidado	200-500	0,600	Ladrillo	silice	540	0,800
Latón	pulido	20-300	0,05-0,032	Carbón,	filamento	1050-1400	0,526
Latón	placa usada	50-350	0,220	Carbón,	carbonilla bujías	95-270	0,953
Latón	mate	50	0,202	Carbón,	negro de humo	20	0,930
Cromo	pulido	37-1100	0,058	Cerámica	alfarería, satinado	20	0,900
Cobre	negro oxidado	37	0,780	Cerámica	porcelana	22	0,920
Cobre	ligeramente mate	25	0,037	Cerámica	refractaria, negra	93	0,940
Cobre	pulido	37-260	0,04-0,05	Arcilla	caldeada	70	91

## APENDICE C

### EMISIVIDADES Y ABSORTANCIA DE ALGUNAS SUPERFICIES

Absortancia solar y emisividad de algunas superficies constructivas		
Material (superficie)	Absortancia	Emisividad
Hoja de aluminio brillante	0.05 - 0.10	0.05 - 0.10
Lámina de aluminio con pátina de oxidación	0.30 - 0.50	0.20 - 0.50
Pintura de aluminio	0.40 - 0.55	0.40 - 0.55
Hierro galvanizado con pátina normal	0.30 - 0.50	0.20 - 0.40
Encalado reciente	0.12	0.90
Madera	0.40	0.90
Ladrillo, teja, piedra	0.70	0.90
Concreto aparente	0.45 - 0.60	0.90
Pintura de aceite blanca	0.20	0.90
Pintura verde o gris, clara	0.40	0.90
Pintura verde o gris, oscura	0.70	0.90
Pintura negra, asfalto	0.85	0.90

Fuentes: M. Evans (1980) y B. Givoni (1976)



Espacenet

**Bibliographic data: MXGT05000012 (A) — 2007-03-30**

---

**SYSTEM FOR DRYING A LEATHER FINISH FILM USING INFRARED ENERGY.**

**Inventor(s):** ROMERO SERGIO ALONSO [MX]; VELA JOSE MARTIN LOPEZ; AGUILAR JONS SANCHEZ ± (SERGIO ALONSO ROMERO, ; JOSE MARTIN LOPEZ VELA, ; JONS SANCHEZ AGUILAR)

**Applicant(s):** CIATEC A C [MX] ± (CIATEC, A. C)

**Classification:** - international: **G01N21/00**  
 - cooperative:

**Application number:** MX2005GT00012 20050930

**Priority number(s):** MX2005GT00012 20050930

**Abstract of MXGT05000012 (A)**

Described is an alternative technology, such as infrared radiation, useful in the leather finish process which quickly and effectively transmits heat for drying an aqueous film, the invention being compared to a traditional convection process. The invention refers to a dryer having gas infrared panels for reducing the exposure time required to dry the aqueous base of a leather finish formulation. The equipment may have up to 10 gas (LP or natural) infrared panels having an independent ignition switch. The drying system includes a conveyor belt with nylon threads resistant to high temperatures generated by the infrared panel gas combustion. The height of each panel and the distance therebetween is adjustable so as to provide versatility to the equipment and allow a wide range of aqueous formulations for leather finish to be dried.



XII encuentro  
Participación de la  
**Mujer**  
en la  
**Ciencia**

16-15 MAYO 2015 Leon, Guanajuato

*Otorga el presente  
**Reconocimiento**  
por su valiosa participación a:*

**BRAVO BRAVO FERNANDO , Alonso Romero Sergio y Frías Chimal José Eduardo**

Por el trabajo:

**SIMULACIÓN Y ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE SECADOR INFRARROJO  
ACABADO DEL CUERO**

**Dra. Amalia Martínez García**  
Representante del Comité Organizador

**Dr. Elder de la Rosa Cruz**  
Director General del CIO





## **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SECADOR POR INFRARROJO PARA EL ACABADO DEL CUERO**

**Dr. Sergio Alonso Romero**

**M.C. José Eduardo Frías Chimal**

**Ing. Fernando Bravo Bravo (estudiante de maestría PICYT)**

**San Miguel de Allende Gto.; 29 de Mayo de 2015**