



CIATEC

Secado por Infrarrojo: Aplicación en el Acabado del Cuero

# Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

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

PRESENTA

**Jöns Sánchez Aguilar**

León, Guanajuato, México Marzo del 2007



CIENCIA Y TECNOLOGIA

## Resumen

La industria de la curtiduría continúa siendo una importante fuente de empleo para la ciudad de León, Guanajuato; por ello, se decidió llevar a cabo un proyecto que apoye este sector. En el presente documento se describe la evaluación y el rediseño de un horno prototipo para el secado de la película de acabado del cuero usando energía infrarroja. Esta tecnología proporciona una rápida y eficiente transferencia de calor para el secado de películas; también se hizo la comparación frente al secado por convección que es tradicional en las tenerías. Asimismo, este nuevo tipo de secadores ofrecen una buena combinación costo-calidad, factores que influyen significativamente para alcanzar el éxito en los mercados internacionales.

Para lograr resultados objetivos y conforme a la tendencia de la comunidad científica internacional, los experimentos se condujeron usando la metodología de superficie de respuesta. En relación a la modelación teórica para la velocidad de transferencia de calor por infrarrojo, ésta se realizó utilizando el método de radiación neta para recintos cerrados. Además, se construyeron nomogramas a partir de modelos experimentales que serán útiles para el operador en planta. Las ventajas fueron la disminución de la longitud a menos del 50 % (respecto a la longitud de un secador típico por convección), y el consumo de gas LP que se redujo en un 25 %.

Como productos adicionales de la investigación, se enviaron dos artículos a la revista *JALCA*, uno fue publicado en el 2006 y el otro está en arbitraje; asimismo, la patente de la innovación se encuentra en trámite.

***Palabras clave:*** Acabado del Cuero, Secado, Energía Infrarroja, Metodología de Superficie de Respuesta, Método de Radiación Neta para Recintos Cerrados.

## **Abstract**

The tannery industry is still an important supply of employment for León, Guanajuato; for this reason, a project was carried in order to help this sector. The current thesis describes the evaluation and the redesign of a prototype furnace used to dry the finishing film of leather by means of infrared energy. This technology gives a quickly and efficient heat transfer for drying films. An assessment versus convection drying that it is traditional in the tanneries was also done. Likewise, these new kind of driers offer a good quality-cost combination, factors that influence significantly the industry success in international markets.

To get objective conclusions and following the trend of international scientific society, the experiments were made using the response surface methodology; in regard to the theoretical modeling for radiation heat transfer, it was done using the net radiation method for enclosures. Moreover, nomographs were constructed from experimental models, which will be useful for the operators in factories. The advantages of the prototype were the dwindle of length at least 50 % (respect to length of a typical convection dryer), and the consume of gas LP was reduced in 25 %.

Extra products of the present research were one article published on 2006 in the *JALCA* journal, there is another in arbitrating and the patent of the innovation is on procedure.

***Key words:*** Finishing of Leather, Infrared Energy, Response Surface Methodology, net radiation method for enclosures.

## **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:

- A mis padres, por todo su cariño y apoyo incondicional, al igual que a mis hermanas y hermanos.
- A mis amigos del Posgrado y a todos los que no puedo nombrar pero que son importantes en mi formación.
- 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.

Para todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

JÖNS SÁNCHEZ AGUILAR

Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas

Marzo 2007

# Índice de contenido

Resumen.....	ii
Abstract.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice de contenido.....	v
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas.....	x
Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Justificación de la investigación.....	4
Objetivos.....	5
Hipótesis.....	5
Capítulo 1. Revisión de literatura.....	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Técnicas de secado.....	6
1.3 Relación de la actual investigación y los trabajos previos.....	9
Capítulo 2. Marco teórico y conceptual.....	10
2.1 Introducción.....	10
2.2 Los modos de transferencia de calor.....	11
Conducción.....	11
Convección.....	14
Radiación.....	16
2.3 Fundamentos de la radiación infrarroja.....	18
La importancia de la radiación térmica en la tecnología.....	18
Radiación de un cuerpo negro.....	19
Propiedades de radiación.....	20

Factor de visión.....	22
Método de radiación neta en recintos cerrados.....	25
2.4 Metodología de superficie de respuesta (MSR).....	26
Definiciones básicas.....	29
Diseños experimentales para ajustar superficies de respuesta.....	30
Método de escalamiento ascendente.....	32
Regresión lineal múltiple.....	34
Capítulo 3. Equipo y procedimiento experimental.....	39
3.1 Introducción.....	39
3.2 Descripción del prototipo.....	39
3.3 Planeación de la investigación.....	43
3.4 Procesamiento digital de imágenes.....	51
3.5 Pruebas físicas para el acabado del cuero.....	52
Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados.....	56
4.1 Introducción.....	56
4.2 Análisis de varianza de los experimentos realizados.....	56
Diseño experimental inicial.....	56
Diseño experimental con gramaje de película incluido.....	60
Diseño experimental para comparar secadores por convección e infrarrojo.....	64
4.3 Uso de los nomogramas.....	66
4.4 Perfil de temperatura del prototipo.....	68
4.5 Segunda versión del secador por infrarrojo.....	70
4.6 Balance de calor para el prototipo.....	77
4.7 Comparación del secador por convección e infrarrojo.....	77
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.....	79
5.1 Conclusiones.....	79

5.2 Recomendaciones futuras.....	79
5.3 Comentarios finales.....	80
Bibliografía.....	81
Apéndice A. Ecuaciones para el análisis teórico.....	85
Apéndice B. Cálculos del balance de calor.....	88
Apéndice C. Resultados de pruebas físicas.....	91
Apéndice D. Artículos publicados y constancias de congresos.....	94

# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1.-</b> Dirección de flujo para el calor.....	11
<b>Figura 2.2.-</b> Los mecanismos de conducción en diferentes fases.....	13
<b>Figura 2.3.-</b> Convección forzada y natural.....	15
<b>Figura 2.4.-</b> Transferencia de calor por radiación.....	17
<b>Figura 2.5.-</b> Ley de desplazamiento de Wien.....	20
<b>Figura 2.6.-</b> Factor de visión entre cuerpos.....	23
<b>Figura 2.7.-</b> Calculo del factor de visión.....	24
<b>Figura 3.1.-</b> Vista frontal del equipo de secado.....	40
<b>Figura 3.2.-</b> Vista superior donde se aprecia el panel de control (1), la banda transportadora (2) y el extractor (6).....	41
<b>Figura 3.3.-</b> Vista lateral e interior del equipo de secado.....	41
<b>Figure 3.4.-</b> Equipo experimental para el secado por infrarrojo a gas.....	49
<b>Figura 3.5.-</b> Ejemplo para medir área mediante PDI.....	51
<b>Figura 3.6.-</b> Equipo para la prueba de flexión.....	53
<b>Figura 3.7.-</b> Equipo para la prueba de fricción.....	54
<b>Figura 3.8.-</b> Equipo para la prueba de adherencia.....	55
<b>Figura 4.1.-</b> Gráfica tridimensional para las respuestas de la Tabla 4.1.....	59
<b>Figura 4.2.-</b> Gráfica de interacción BD para la Tabla 4.2.....	59
<b>Figura 4.3.-</b> Gráfica tridimensional para las respuestas de la Tabla 4.3.....	62
<b>Figura 4.4.-</b> Gráfica de interacción AB para la Tabla 4.4.....	63
<b>Figura 4.5.-</b> Validación de la Ecuación 1.....	64
<b>Figura 4.6.-</b> Nomograma para secado óptimo en la película de acabado del cuero.....	67
<b>Figura 4.7.-</b> Nomograma para varios porcentajes de evaporación.....	68
<b>Figura 4.8.-</b> Perfil de temperatura para varios porcentajes de evaporación.....	70
<b>Figura 4.9.-</b> Validación de las Ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5.....	71
<b>Figura 4.10.-</b> Nomograma para validar la eficiencia del nuevo diseño.....	74



**Figura 4.11.-Enfriamiento del cuero a la salida del túnel**  
secando 4.3 gr / ft<sup>2</sup> de agua.....76

# Índice de Tablas

Tabla 2.1.-Estructura de los datos para la regresión.....	36
Tabla 3.1.-Diseño experimental utilizado para el cribado.....	44
Tabla 3.2.-Diseño experimental utilizado para estudiar la superficie de respuesta.....	45
Tabla 3.3.-Arreglo experimental para contrastar con secador por convección.....	47
Tabla 3.4.-Arreglo experimental para evaluar los escudos de radiación.....	48
Tabla 4.1.-Diseño experimental utilizado para el cribado.....	57
Tabla 4.2.-Anova para el porcentaje de evaporación de la Tabla 4.1.....	58
Tabla 4.3.-Diseño experimental utilizado para estudiar la superficie de respuesta.....	61
Tabla 4.4.-Anova para el % evaporación de la Tabla 4.3.....	62
Tabla 4.5.-Arreglo experimental para contrastar los secadores.....	65
Tabla 4.6.-Anova para el porcentaje de evaporación de la Tabla 4.5.....	66
Tabla 4.7.-Temperatura después de cada panel (° C).....	69
Tabla 4.8.-Arreglo experimental usado para comparar la innovación.....	73
Tabla 4.9.-Anova para el % de evaporación de la Tabla 4.8.....	75
Tabla 4.10.-Comparación de secadores.....	78

## ***Introducción***

En nuestra época, las organizaciones se encuentran en un mercado extremadamente competitivo donde solamente las más eficientes sobreviven, entendiéndose eficientes, aquellas compañías que prosperan en la capacidad de optimizar sus procesos, recursos financieros, materiales y humanos.

La solución a la problemática anterior ha tomado sentido en los últimos años y no es tarea sencilla. En todo ambiente productivo es necesario mejorar los procesos, sobre todo aquellos que son críticos e influyen de manera clave en el desempeño global del sistema.

La aportación de esta investigación es la generación de conocimiento científico acerca del secado de películas de acabado de cuero empleando energía infrarroja, pues no existe bibliografía al respecto. Tal aseveración es apoyada por las siguientes líneas de la revista *JALCA*, en relación al primer artículo publicado producto de esta investigación:

***“The authors site no previous work on infrared drying in leather finishing, which I confirmed in my own search with the help of others”*** Kenneth A. Boni, Ph.D.  
*Journal* Editor. Manuscript 471 (2005).

El objetivo central de esta tesis es evaluar y rediseñar un secador prototipo para la película de acabado del cuero por medio de energía infrarroja a gas. Para ello, este documento se ha dividido en cinco capítulos:

Capítulo 1. “Revisión de literatura”, donde se presenta la investigación de la bibliografía que aborda diferentes técnicas de secado. En él se expone la originalidad de esta tesis. Las pocas referencias halladas fueron estudios que utilizaron la radiación térmica para el secado del papel, la cual se ha aplicado con éxito en industrias de E.U.A. y Canadá. Por otra parte, diferentes investigadores utilizaron microondas para secar el cuero, no la película de acabado.

Capítulo 2. “Marco teórico y conceptual”, aquí se identifican los conocimientos necesarios para desarrollar el proyecto. Se inicia con una definición del calor y sus modos de transferencia. De igual forma, se abordan los fundamentos de la radiación infrarroja y la metodología de superficie de respuesta.

Capítulo 3. “Equipo y procedimiento experimental”, se describen los componentes y el modo de operación del prototipo usado en la investigación. Además, se expone la estrategia experimental adoptada, cuyo propósito principal fue obtener conclusiones objetivas al emplear una metodología para planear y desarrollar el estudio.

Capítulo 4. “Análisis y discusión de resultados”, en esta sección se discute un modelo matemático-estadístico que predice la evaporación bajo diferentes condiciones de operación, y con ello construir nomogramas de secado evitando que el industrial aplique el procedimiento convencional de prueba y error para determinar los parámetros de trabajo. Además, se describe el uso de escudos de radiación para mejorar la innovación.

Para finalizar el Capítulo 5. “Conclusiones y Recomendaciones”, recapitula las ventajas de tamaño, tiempo de residencia y consumo de gas respecto al secado por convección; también se plantean algunas ideas para continuar esta línea de investigación.

## ***Planteamiento del problema***

Las empresas, en forma permanente, están inmersas en un ambiente altamente competitivo. El propósito de una toma de decisiones en una empresa, es la asignación de los recursos escasos a las acciones que redunden en mayor beneficio para ella (Eppen, 2000). Las tenerías no son la excepción, pues las pieles han sido desde siempre un producto valioso, y desde la exploración del Nuevo Mundo su manufactura era llevada a cabo empíricamente. Actualmente, se han realizado pocos estudios científicos en procesos para el secado del acabado del cuero; sin embargo, las compañías que consigan enfocar sus esfuerzos para mejorar sus procesos, tanto en el corto como en el largo plazo, definitivamente serán las que tendrán éxito en el mercado.

Aunque se han presentado sucesos contra la industria curtidora, la misma continúa siendo eje principal de la economía para el estado de Guanajuato y sus alrededores (José Alfredo Rosas, reporte interno CIATEC, Investigaciones de Mercado). En los últimos años el número de empleos directos de esta industria ascendía a 9,143 repartidos en 619 compañías curtidoras. Por ello es primordial allegar teorías y conocimientos científicos que permitan alcanzar ventajas sobre sus competidores.

En la fabricación de cuero la etapa de acabado en seco es trascendental, pues, la primera impresión de un cliente al adquirir un producto de cuero es su *acabado*.

Los conocedores reconocen que el cambio de un cuero natural a uno con acabado es notable. Además, es la parte de la manufactura que tiene como objetivo el disminuir (o desaparecer si fuese posible) los defectos superficiales, aparte de proveer a la superficie externa mejores propiedades físicas.

El diseño básico de los secadores tradicionales por convección consiste en elevar la temperatura ambiental dentro del túnel con el objeto de incrementar la “fuerza”, para evaporar el agua del acabado. Aire fresco es introducido y calentado, el calor del aire se utiliza para reducir la humedad de la película de acabado (por evaporación) y el aire húmedo es desplazado a la salida del túnel removiendo el

vapor de agua del sistema. Los secadores por convección usan gas LP; sin embargo, los ventiladores que mueven el aire caliente sobre el cuero son eléctricos. El ciclo nunca se detiene, y en la mayoría de los casos al menos el 50 % del aire es arrojado fuera, según señala optimum air corporation. Además, la principal limitación de un horno de convección es su baja tasa de transferencia de calor con una inherente necesidad de mover aire rápidamente. En otras palabras, estos secadores ocupan un mayor espacio, la inversión inicial es mayor, y hay una dilapidación de energía por el calentamiento del aire.

A manera de comparación, un fabricante estadounidense de calentadores refiere que usar tecnología infrarroja ha permitido en varios casos ahorrar al menos un 30 % de combustible, frente a los sistemas de aire forzado por convección (Space-Ray, 2006).

### ***Justificación de la investigación***

Los sistemas actuales de secado por convección tienen un tiempo de residencia que es necesario disminuir para aumentar la productividad. Esto indiscutiblemente se traducirá en un aumento de satisfacción del cliente, reducción de pérdidas por entregas tardías, y en general, un mejor rendimiento del sistema global. De igual forma, los hornos por convección son de gran tamaño (hasta 16 metros de largo) ocupando un área de planta importante.

La población que se beneficiará con los resultados del presente trabajo de investigación serán los curtidores y la comunidad científica interesada en el campo, debido a que es un área de pocos reportes científicos, y por lo mismo, de oportunidad para los intelectuales y profesionales de las carreras afines. Por otra parte, nuevas líneas de investigación en el campo que se aborda pueden ser sugeridas.

## **Objetivos**

- Evaluar y rediseñar un secador prototipo para la película de acabado del cuero por medio de energía infrarroja a gas, a través de técnicas de calidad modernas que permitan determinar los niveles óptimos de funcionamiento.
- Desarrollar nomogramas que faciliten el estudio de los factores que afectan el secado de la película.

## **Hipótesis**

Usando paneles infrarrojos a gas, se puede ahorrar energía en la etapa de acabado en seco del cuero y reducir el largo del secador sin demeritar las propiedades de la película de acabado. Un modelo proveniente del análisis experimental podría ayudar a entender el proceso de evaporación para un secador por infrarrojo.

# Capítulo 1

## ***Revisión de literatura***

### ***1.1 Introducción***

El proceso de curtido se clasifica en cuatro etapas; la primera se denomina “Ribera”, en ella se lleva a cabo la limpieza de la piel eliminando los componentes que no son transformables en cuero. En la segunda fase llamada “Curtido”, se logra impartir estabilidad química y física al sustrato evitando su putrefacción. La tercera etapa se conoce como Recurtido, Teñido y Engrase “RTE”, aquí se consigue que el cuero adquiera suavidad, color y otras características que son necesarias para fabricar artículos comerciales. Finalmente, en la cuarta etapa denominada “Acabado” se adecua el cuero con las particulares que el mercado impone a cada tipo de producto, aparte de mejorar las características de estética, textura y protección. En la fase de RTE y Acabado se necesita secar respectivamente el sustrato y la formulación que se aplica al cuero. De este modo, esta tesis se enfoca en evaluar y optimizar el secado de la película de acabado usando radiación infrarroja.

En la presente sección se discutirá el origen de estudiar este tema y los métodos que se han empleado para evaporar el vehículo de las formulaciones para el acabado del cuero. Finalmente, se expone la relación de la actual investigación y los trabajos previos.

### ***1.2 Técnicas de secado***

Hay una enorme variedad de industrias que demandan sistemas de secado. Hoy en día estos procedimientos se pueden dividir en convección, mecánicos y radiación (Hulls, 1987). Actualmente, todos estos métodos usan electricidad ó gas LP para extraer la humedad de los materiales. Los métodos de convección



transfieren su calor a través de las moléculas calientes y frías, al aumentar la temperatura de un fluido se incrementa la presión de vapor, consiguiendo liberar la humedad del producto. Por otro lado, los cuchillos de aire son considerados la única forma de secado mecánico; esencialmente son hojas de aire a baja presión cuya velocidad es alta y principalmente se emplean para remover la humedad de la superficie. En el caso de la radiación no se necesita un medio para transmitir la energía; ésta viaja en forma de ondas electromagnéticas. Hay tres técnicas principales de secado por radiación: infrarroja, microondas y ultravioleta.

A continuación se resumen algunos autores que han investigado los anteriores sistemas de secado: Skansi y *col.* (1995) reportaron una investigación realizada en un laboratorio a escala para secar el cuero aplicando microondas; donde se llevaron a cabo experimentos para tres diferentes potencias de calor: bajo, medio y alto. Asimismo se graficaron varias curvas para las muestras de cuero empleadas, la energía utilizada contra el tiempo de secado, concluyendo que hay una buena correlación (0.98) entre esas dos variables. La idea de usar microondas para el secado produjo excelentes resultados, sin embargo, el escalamiento a nivel industrial es inviable.

Por otra parte, Komanowsky (1990) señala que aplicar microondas al secado del cuero es muy funcional cuando se desean arear cueros gruesos, pues se debe controlar muy cuidadosamente la potencia suministrada para evitar daños por sobrecalentamiento. El estudio fue contrastado frente al popular método de convección; una ventaja que no ha sido aprovechada al máximo es que la distribución de la humedad es casi uniforme sobre el área total y hacia adentro del cuero. El comportamiento es distinto cuando se aplica la técnica tradicional, la superficie está mucho más caliente y seca que el centro, lo cual no es conveniente para el sustrato.

Dentro de otras investigaciones, Monzó-Cabrera y *col.* (2000) indagaron la cinética del secado del cuero combinando microondas y aire caliente. En los anteriores reportes expuestos únicamente se usaron microondas, lo novedoso del presente artículo fue el empleo de la convección forzada. Según los autores, hay dos

ventajas interesantes: se redujo enormemente el tiempo de secado, un poco más del 90 % respecto al secado por convección; y la temperatura interna y superficial de las probetas no excedió de 70° C.

En relación al uso de la energía infrarroja para la industria del secado, solamente se encontraron documentos formales que abordan el secado para las hojas de papel, por ejemplo, Seyed-Yagoobi y *col.* (2001) escribieron que en la máquina piloto construida, sus resultados experimentales demostraron logros significativos en las tasas de secado. Otra ventaja es que la transferencia de energía por infrarrojo no necesita que los emisores y el papel estén en contacto, lo cual es bastante atractivo para este proceso y más todavía para el secado de películas de acabado. Al mismo tiempo, desarrollaron un modelo teórico el cual predice adecuadamente los resultados observados. Finalmente, sugieren estudiar con mayor profundidad el tema, pues, en E.U.A. y Canadá el 27 % de las empresas del papel utilizan estos procesos.

Peltoniemi y Hilden (1998) compararon los calentadores a gas versus los eléctricos: se recomienda emplear los segundos para el secado del papel, debido a que es preferible utilizar la región del infrarrojo cercano, ya que el calor puede penetrar a través de las porosidades lo cual permite secar el lado opuesto (de abajo hacia arriba). Los secadores por infrarrojo son fácilmente controlables, de esta manera se usa únicamente la potencia necesaria de acuerdo al contenido de humedad del sustrato o la velocidad de la máquina que fabrica el papel. Otros investigadores que exploraron los beneficios de usar la radiación calorífica para el secado del papel fueron Seyed-Yagoobi y Wirtz (2001), quienes enfatizan que hay una carencia de información fundamental que explique el fenómeno de transporte que ocurre dentro de las hojas de papel cuando la energía es suministrada desde un emisor infrarrojo. En su informe concluyeron que los secadores infrarrojos son más versátiles para adaptarse cómodamente a los constantes incrementos de velocidad en una máquina de fabricación de papel. Por otro lado, ellos prefieren emplear emisores de cerámica que calentadores eléctricos, pues, la temperatura de superficie para los primeros alcanza los 800 a 1100° C, es decir, la región de

emisión dentro del espectro electromagnético es del orden de 1.6 a 10  $\mu\text{m}$ ; lo cual significa que el aprovechamiento del calor es mejor que los emisores eléctricos que transfieren la mayor parte de energía en la zona del infrarrojo cercano (0.7 a 1.4  $\mu\text{m}$ ). Por otra parte, Hulls (1987) comenta que emisores infrarrojos operando por debajo de 800° C producen energía de onda larga y convierten aproximadamente la mitad de la radiación en calor por convección.

### ***1.3 Relación de la actual investigación y los trabajos previos***

La investigación aquí descrita demostró que el secado por infrarrojo a gas es una innovación para la industria de la curtiduría, ya que los tradicionales hornos de secado por convección son de gran tamaño y la velocidad de transferencia de calor es lenta. El estudio se enfocó en que a partir de experimentación se desarrollaron modelos que predicen el desempeño del secador. Estas ecuaciones fueron significativas, pues en la sección anterior se corroboró que hay una escasez de bibliografía sobre el secado por infrarrojo para el acabado del cuero; además, usando los modelos se han construido nomogramas que serán muy prácticos para los operadores del equipo. Por ello se puede decir que el presente trabajo confirmó que usando energía infrarroja a gas, se puede ahorrar combustible en la etapa de acabado en seco del cuero y reducir la longitud del secador sin demeritar las propiedades de la película de acabado.

También, se debe observar que para la investigación se usaron técnicas modernas de experimentación tales como la metodología de superficie de respuesta. Cabe destacar que en la bibliografía citada en la sección anterior, no se encontró información acerca de los diseños experimentales utilizados, posiblemente porque sus experimentos fueron planeados empleando la técnica de un factor a la vez; la cual se ha demostrado que no es la manera más objetiva de conducir una investigación (Box, 1999).

## Capítulo 2

### ***Marco teórico y conceptual***

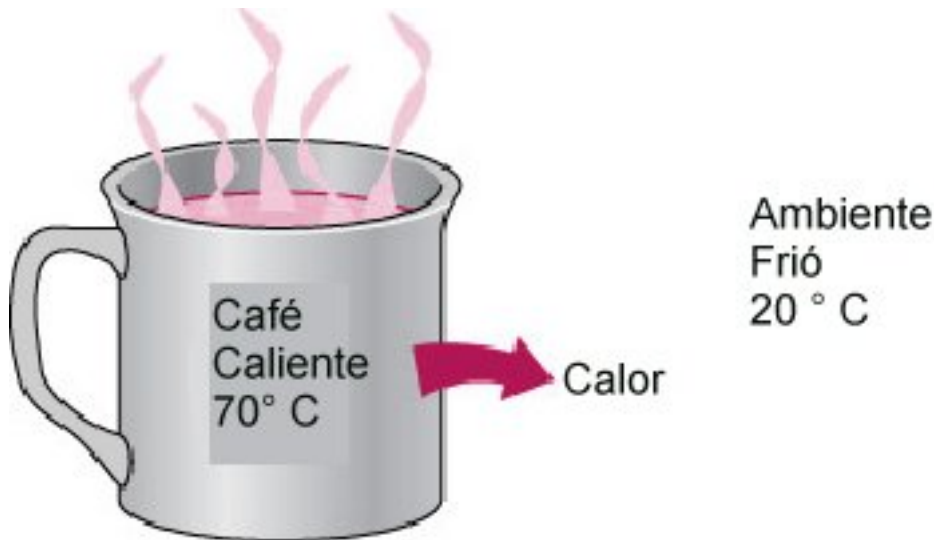
#### ***2.1 Introducción***

Siempre que existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. Por ejemplo, en una taza de café caliente a  $70^{\circ}\text{C}$  la energía fluye de ésta hacia el ambiente que se encuentra en promedio a  $20^{\circ}\text{C}$  (Figura 2.1); la energía transmitida, según los conceptos de la termodinámica, se denomina *calor*.

En el presente capítulo se discuten los temas referentes a procesos físicos de la transferencia de calor como son conducción, convección y radiación. Aunque estos tres procesos se pueden presentar simultáneamente, ocurre comúnmente que uno de los mecanismos de transmisión predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por conducción, el agua de una cacerola que se coloca sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra recibe calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

En nuestros días la radiación térmica cobra importancia debido a las múltiples aplicaciones en el espacio exterior y la necesidad de mejorar el aprovechamiento de los recursos energéticos. En esta sección se abordan los conceptos de emisividad, absorptividad, transmitividad, y reflexividad, parámetros que ayudan a caracterizar el tipo de superficie; asimismo, se explican las leyes que permiten estudiar la radiación de un cuerpo negro y la definición de un parámetro clave (factor de visión) en el análisis teórico. Además, se describe un procedimiento para modelar la transferencia inicial de energía por infrarrojo, conocido como “método de radiación neta en recintos cerrados” (Cengel, 2003; Siegel y Howell, 2002).

Finalmente, hoy en día es axiomático que parte del éxito de una investigación científica radica en una buena planeación experimental; atendiendo a ello, se describen útiles diseños experimentales para ajustar superficies de respuesta que ayudarán a estudiar objetivamente el secado del acabado del cuero.



**Figura 2.1.-**Dirección de flujo para el calor.

## **2.2 Los modos de transferencia de calor**

Cengel (2003) menciona que el calor es la forma de energía que puede transferirse de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperatura. La transferencia de energía como calor es siempre de un medio de temperatura alta a uno de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura. El calor puede ser transferido en tres diferentes modos: conducción, convección, y radiación. En todas las formas se necesita la presencia de una diferencia de temperatura.

### **Conducción**

La conducción es el modo de transferencia térmica en el que el calor viaja desde una capa de temperatura elevada a otra capa de inferior temperatura debido al

contacto directo de las moléculas del material. El movimiento de energía va desde partículas con alta energía interna de una sustancia hacia partículas adyacentes con menor energía resultado de la interacción entre ellas. La conducción puede darse en sólidos, líquidos, o gases tal como se aprecia en la Figura 2.2. En los gases y líquidos, este fenómeno es el resultado de la colisión y difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos, es consecuencia de la vibración de las moléculas en una estructura geométrica y el transporte de energía de los electrones libres.

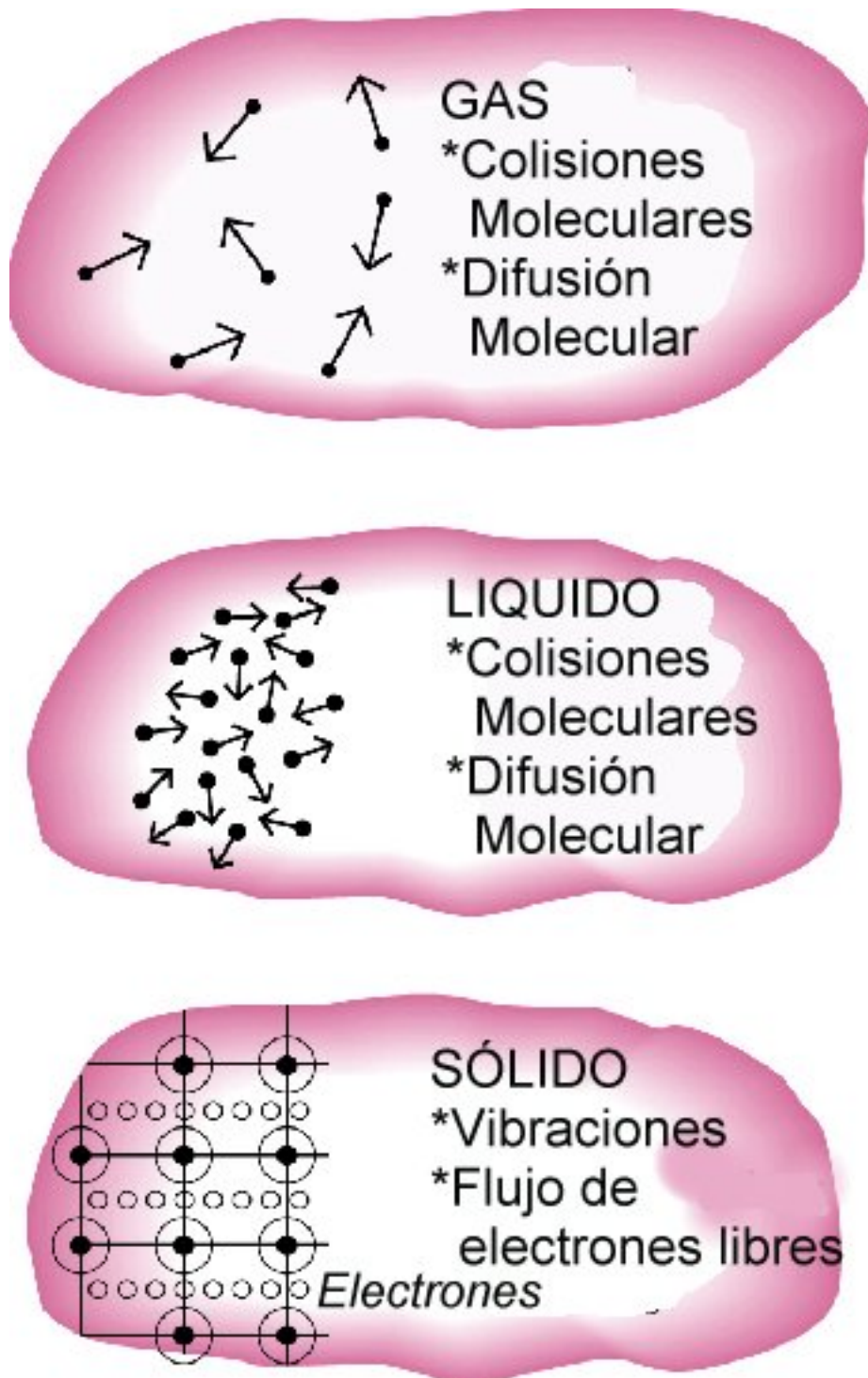


Figura 2.2.-Los mecanismos de conducción en diferentes fases.

La velocidad de conducción del calor a través de un medio depende de su geometría, su espesor, el tipo de material y la diferencia de temperatura a través del medio (Ecuación 2.1).

$$\text{Velocidad de transferencia} \propto \frac{(\text{Area})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}} \quad (2.1)$$

La transferencia del calor por conducción también se puede modelar con la ley de Fourier (Ecuación 2.2):

$$q = -k\nabla T \quad (2.2)$$

Donde:

$$q = \text{Flujo de calor} \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

$$\nabla T = \text{Gradiente de temperatura} \left( \frac{^{\circ}C}{m} \right)$$

$$k = \text{Conductividad térmica} \left( \frac{W}{m \cdot ^{\circ}C} \right)$$

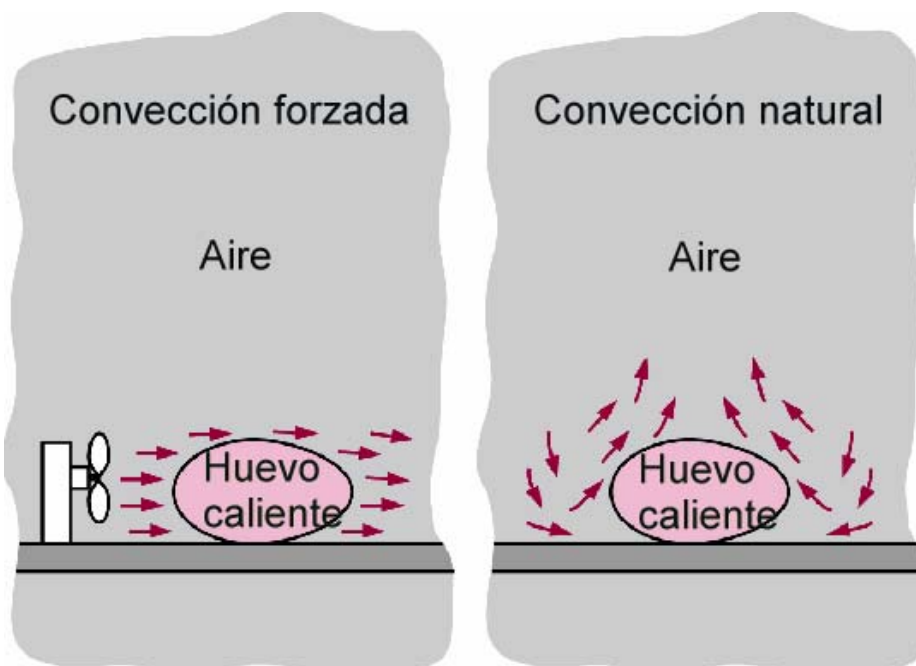
El signo negativo de la Ecuación 2.2 es una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica. Originalmente la conductividad térmica se asumía como una cantidad escalar; sin embargo, en tiempos modernos se ha visto que es un tensor  $k_{ij}$  cuyos elementos fuera de la diagonal en muchas ocasiones son igual a cero. Mahan (2002) comenta que en algunas situaciones particulares la relación entre el flujo de calor local y el gradiente de temperatura local se observa un desvío de la ley de Fourier. Esta desviación pudiese ser atribuida a la variación en la conductividad térmica según la posición, dirección o temperatura, e inclusive alguna combinación de esos tres factores.

## Convección

El fenómeno de transmisión de calor por convección demanda la presencia de un fluido (líquido o gas) en la vecindad de su superficie, y se halla íntimamente relacionado con su movimiento, mientras más grande sea la velocidad del fluido,



mayor transferencia de calor por convección. La convección forzada (Figura 2.3) se presenta cuando el fluido es obligado a moverse sobre la superficie por medios externos tales como un ventilador, una bomba, o el viento. Por el contrario, cuando el movimiento del fluido es resultado de fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidades debido a la desigualdad en la temperatura dentro del fluido se llama convección natural.



**Figura 2.3.-** Convección forzada y natural.

Cengel (2003) comenta que la transferencia de calor por convección es complicada por el hecho que involucra fluidos en movimiento y depende de las propiedades del fluido: viscosidad dinámica, conductividad térmica, densidad, calor específico y la velocidad del fluido. A pesar de la complejidad, se puede decir que la velocidad de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y puede expresarse mediante la ley de enfriamiento de Newton como:

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Donde :

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$

$A_s$  = Area de la superficie

$T_s$  = Temperatura de la superficie

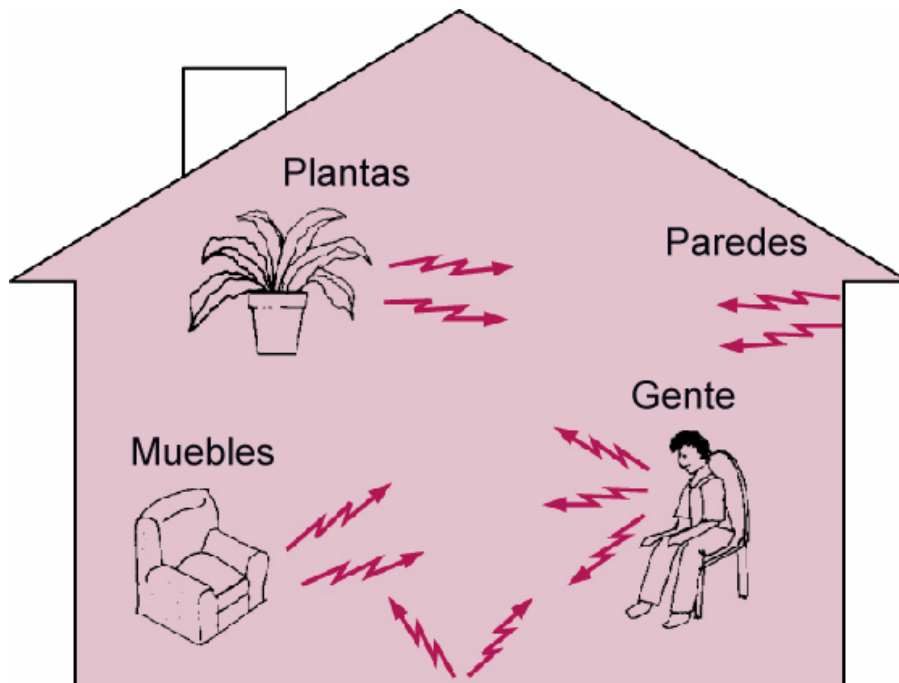
$T_\infty$  = Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie

El coeficiente  $h$  no es una propiedad del fluido; este parámetro es determinado experimentalmente, el cual depende de todas las otras variables que influyen en la convección.

## **Radiación**

En la conducción y convección es requisito la existencia de un medio material para transportar la energía, en la radiación esto no es necesario.

En la Figura 2.4, se muestra un intercambio de calor entre elementos que comúnmente se hallan en una casa. Este modo de transferencia de energía ocurre cuando una superficie intercambia calor con los alrededores mediante la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas.



**Figura 2.4.-**Transferencia de calor por radiación.

Siegel y Howell (2002) mencionan que la radiación electromagnética es continuamente emitida desde todas las sustancias y objetos debido a la agitación molecular y atómica asociada con su energía interna; en equilibrio, la energía interna es proporcional a la temperatura del material. La energía infrarroja va desde  $0.7 \mu\text{m}$  a  $1000 \mu\text{m}$ , aunque la región es dividida en infrarrojo cercano hasta  $25 \mu\text{m}$ , y de aquí hasta  $1000 \mu\text{m}$  en infrarrojo lejano.

Aunque la energía radiante se manifiesta frecuentemente en nuestros alrededores, el ser humano no es capaz de detectarla ya que el cuerpo solo siente una porción del espectro. Los ojos son detectores sensibles de luz, siendo capaces de formar imágenes de objetos, pero son insensibles a la radiación de calor (infrarroja). La piel es un detector directo para la radiación de calor, sin embargo no es muy eficaz. La piel no tiene la habilidad de formar imágenes de superficies calientes o frías a menos que la radiación de calor sea muy grande.

Cengel (2003) comenta que los rayos X, rayos gamma, microondas, ondas de radio, televisión, etc., son parte del espectro electromagnético; sin embargo, éstas

no se relacionan con la temperatura y no son estudiadas con técnicas de transferencia de calor. Además, la radiación infrarroja se considera un fenómeno de la superficie para algunos sólidos, pues hay varios cuerpos que son opacos a la radiación térmica; algunos ejemplos son los metales, la madera y las rocas. Investigaciones al respecto han demostrado que la radiación emitida en el interior de estos materiales nunca alcanza la superficie y la radiación incidente del entorno normalmente es absorbida dentro de los primeros micrones de la superficie. La máxima radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura absoluta  $T_S$  (en K o R) se modela con la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 2.4)

$$\dot{Q}_{Max,Emit} = \sigma A_S T_S^4 \quad (2.4)$$

Donde:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$$

$A_S$  = Área de la superficie

$T_S$  = Temperatura absoluta (K)

### **2.3 Fundamentos de la radiación infrarroja**

#### **La importancia de la radiación térmica en la tecnología**

Cengel (2003), Mahan (2002), Siegel y Howell (2002) dicen que para la conducción y convección, la transferencia de energía entre dos objetos depende de su diferencia de temperatura a la primera o segunda potencia, mientras que la transferencia de energía por radiación térmica entre dos cuerpos obedece a la diferencia de temperatura absoluta a la cuarta potencia. Por lo tanto, el estudio de la radiación es importante porque se pueden modificar las distribuciones de temperatura de los objetos, y en consecuencia, ser capaz de influir en la conducción, convección natural, y/o convección forzada. Por ejemplo, la energía infrarroja puede penetrar los aislamientos de fibra de vidrio agregando flujo de

calor a la conducción. La radiación puede calentar las paredes de un recinto cerrado, produciendo convección libre donde ordinariamente no ocurriría. Además, el tema de transferencia de calor por radiación se ha desarrollado rápidamente por la necesidad de diseñar dispositivos que operen en el espacio exterior; por el diseño de motores y cámaras de combustión que operen en puntos de máxima eficiencia térmica; debido a la exigencia en desarrollar aplicaciones de energía solar tales como los hornos o colectores solares; y por las mejoras de algunos procesos de manufactura como por ejemplo el procesamiento de obleas para semiconductores, la fabricación de vidrio, y el diseño de secadores para películas de acabado, etc.

### **Radiación de un cuerpo negro**

La cantidad de energía radiante emitida desde una superficie en una longitud de onda específica depende del material del objeto, las condiciones y temperatura de la superficie. Por lo tanto, cuerpos disímiles emitirán diferentes cantidades de radiación por unidad de área superficial, incluso cuando todos se hallen a una idéntica temperatura. Una superficie que emite la máxima radiación a una temperatura específica se llama cuerpo negro. Sin embargo, superficies reales emiten menos energía que un cuerpo negro en la misma longitud de onda. Siegel y Howell (2002) dicen que pocos materiales tales como el carbón, el platino negro, el petróleo y algunas pinturas especiales poseen propiedades muy aproximadas a un cuerpo negro. Se debe recordar que un cuerpo negro no es necesariamente de color negro, pues una superficie que absorbe la luz visible ( $0.40 - 0.76 \mu\text{m}$ ) a la vista aparentará ser negro, y una superficie que la refleje se verá como blanca. Por ejemplo, la nieve refleja la luz viéndose blanca al ojo humano, pero la misma es esencialmente negra para la radiación infrarroja ya que es un excelente absorbedor de radiación en esa longitud de onda. La ecuación que describe la potencia de emisión de un cuerpo negro en toda la región espectral fue desarrollada por Max Planck en 1901 en su famosa teoría cuántica. La Ecuación

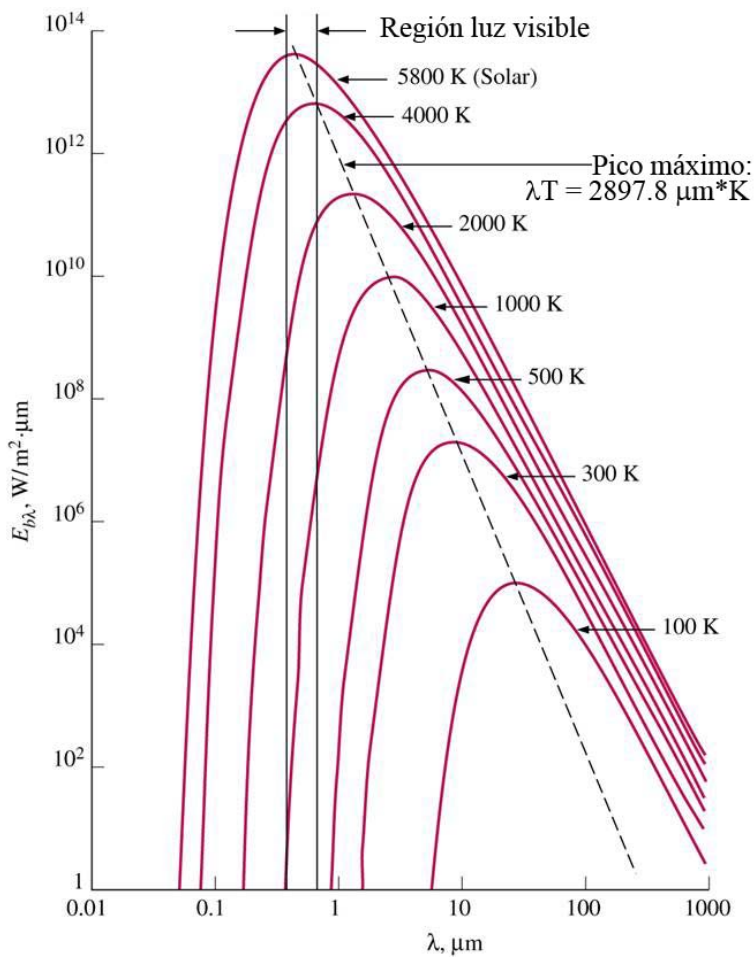
2.5 es conocida como la ley de Planck y es válida para una superficie en el vacío o en un gas.

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{3.742 \times 10^8}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{1.439 \times 10^4}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}) \quad (2.5)$$

Donde:

$\lambda$  = Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )

$T$  = Temperatura absoluta (K)



**Figura 2.5.-Ley de desplazamiento de Wien**

En la Figura 2.5, aparecen diversas gráficas de la longitud de onda contra la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura específica; cada pico máximo puede ser determinado por la ley de desplazamiento de Wien. La Ecuación 2.6 se obtiene derivando la ley de Planck respecto a la longitud de onda manteniendo una temperatura constante, posteriormente se iguala a cero para resolver la expresión resultante.

$$(\lambda T)_{\text{Max Pot}} = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2.6)$$

De igual modo, la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 2.7) se puede deducir a partir de la integración de la Ecuación 2.5. Esta ley modela la potencia total de emisión en todas las longitudes de onda desde  $\lambda = 0$  hasta  $\lambda = \infty$  para un cuerpo negro a una temperatura definida.

$$\lambda T^4 = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.7)$$

### Propiedades de radiación

Para cuantificar la proximidad de una superficie real a un cuerpo negro se utiliza la variable llamada emisividad ( $\epsilon$ ); su rango de valores es desde 0 hasta 1. Una definición más completa enunciada por Cengel (2003) es: “La emisividad de una superficie representa la razón de la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emanada por un cuerpo negro a la misma temperatura”. Es evidente que la emisividad de un cuerpo negro es 1. Otra propiedad importante de la radiación para una superficie es la absorptividad ( $\alpha$ ), la cual es descrita como la fracción de energía que es absorbida por la superficie. Un cuerpo negro atrae toda la radiación incidente en él, para cualquier longitud de onda y dirección. El rango de valores es análogo a la emisividad. Sin embargo, la

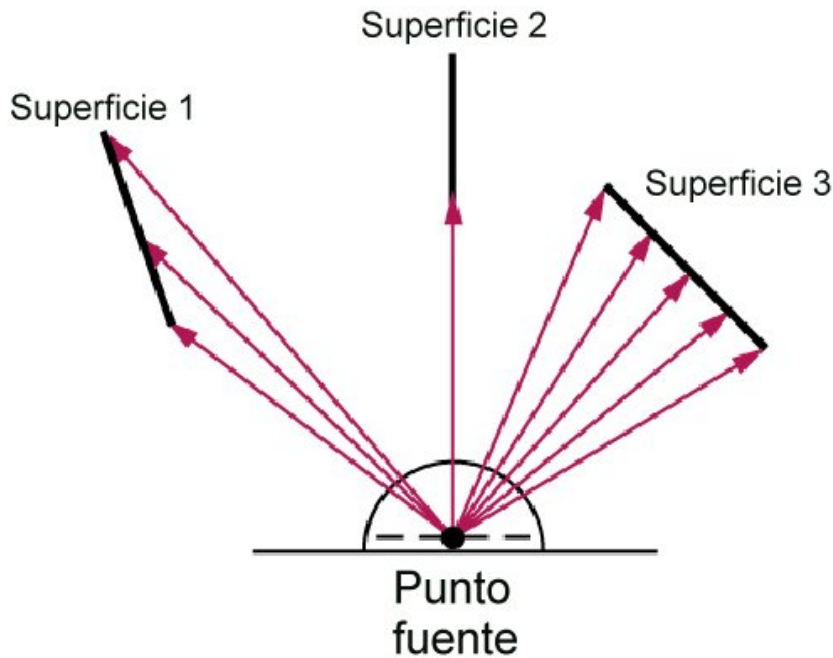
absortividad de superficies reales tiene complejidades adicionales, ya que las características direccionales y espectrales de la radiación incidente deben incluirse en el respectivo análisis. Como en otras áreas de la física, existen supuestos que facilitan el estudio de la transferencia de calor por radiación. Se dice que una superficie difusa es aquella donde sus propiedades son independientes de la dirección, y gris si sus propiedades son independientes de la longitud de onda. Por lo tanto, la emisividad de una superficie gris y difusa es simplemente la emisividad hemisférica total de esa superficie ya que es independiente de la dirección y la longitud de onda.

Todos los objetos emiten constantemente energía infrarroja, y la emisividad representa las características de emisión de esos cuerpos. Esto significa que todos los cuerpos, incluyendo el nuestro, está constantemente bombardeando con radiación hacia todas direcciones dentro de un rango de longitudes de onda. Entonces, el flujo de radiación incidente sobre una superficie se llama irradiación. Resumiendo, cuando los fotones de IR chocan sobre una superficie, parte de ésta es absorbida, parte de ésta es reflejada, y el resto, si es que la hay, es transmitida. La fracción de irradiación absorbida por la superficie es conocida como absortividad ( $\alpha$ ), la fracción reflejada por la superficie es llamada reflexibilidad ( $\rho$ ), y la fracción transmitida es nombrada transmitividad ( $\tau$ ).

### **Factor de visión**

Cengel (2003), Mahan (2002), Manrique (2002), Siegel y Howell (2002) señalan que el intercambio de calor por radiación entre dos o más superficies a distinta temperatura depende de la orientación de unas en relación con las otras y las propiedades intrínsecas de los cuerpos (Figura 2.6).





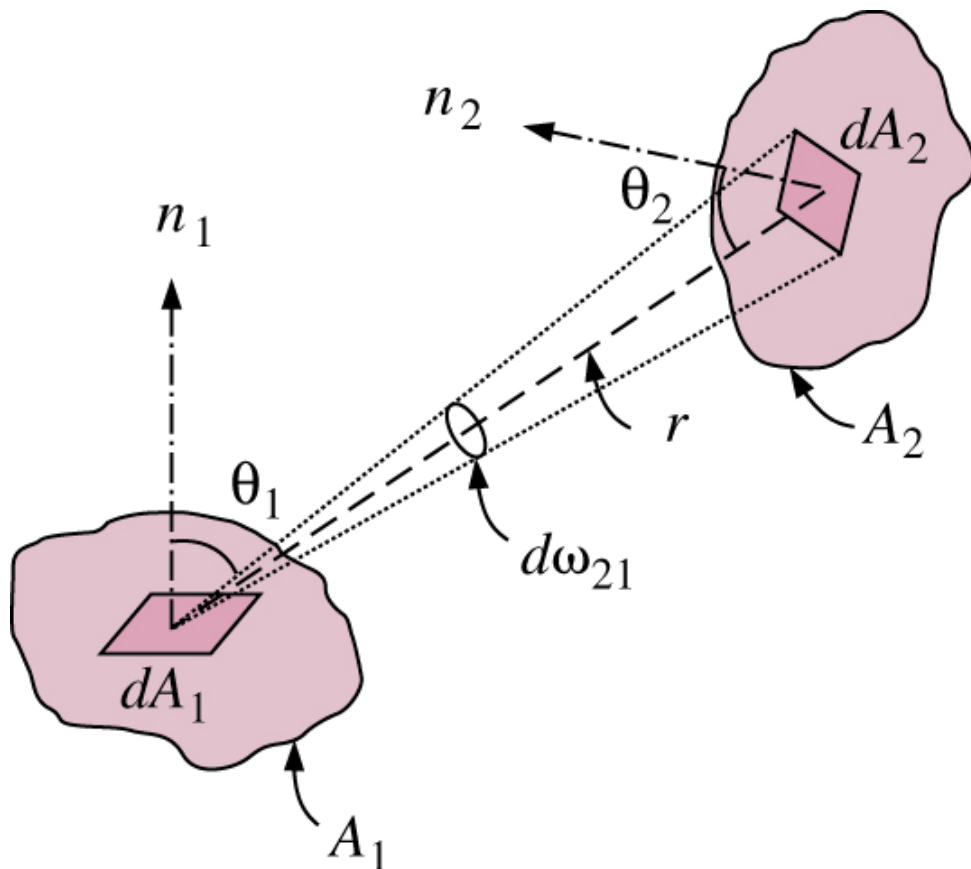
**Figura 2.6.-**Factor de visión entre cuerpos.

El factor de visión (FV) es una cantidad puramente geométrica independiente de las propiedades de la superficie y de la temperatura. También es conocido como factor de forma, factor de ángulo y factor de configuración. El factor de visión de una superficie  $i$  hacia una superficie  $j$  se denota por  $F_{ij}$ , Cengel (2003), Mahan (2002), Manrique (2002), y Siegel y Howell (2002) coinciden en la siguiente definición:

$F_{ij}$  = La fracción de la radiación que sale de la superficie  $i$  y choca directamente contra la superficie  $j$

Hay un punto importante respecto a este parámetro que se debe señalar: la radiación que choca contra una superficie no es absorbida necesariamente por esa superficie. De este modo, en la evaluación de los factores de visión, no se considera la radiación que choca contra una superficie después de ser reflejada por otras.

La Ecuación 2.8 es el cociente entre la radiación que choca contra  $A_2$  y la radiación total que sale de  $A_1$ . De este modo, se calcula el factor de visión entre dos cuerpos como los mostrados en la Figura 2.7; es claro que este parámetro (FV) depende de la orientación ( $\theta_1, \theta_2$ ) y la distancia ( $r$ ) entre los cuerpos. Entonces, se puede deducir el factor de visión  $F_{12}$  entre dos superficies  $A_1$  y  $A_2$  expresando el factor de visión entre las dos áreas diferenciales  $dA_1$  y  $dA_2$  en términos de las variables espaciales y, a continuación, llevar a cabo las integraciones necesarias. Sin embargo, este procedimiento no resulta eficiente pues incluso, en las configuraciones geométricas más sencillas, las integrales suelen ser difíciles de realizar.



**Figura 2.7.**-Cálculo del factor de visión.

$$F_{ij} = \frac{\dot{Q}_{A1 \rightarrow A2}}{\dot{Q}_{A1}} = \frac{1}{A_1} \int_{A2} \int_{A1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (2.8)$$

El método de las cuerdas cruzadas que sugieren Cengel (2003) y Siegel y Howell (2002) es práctico al suponer configuraciones geométricas bidimensionales, puesto que cualquier interacción por radiación a través de las superficies de los extremos será despreciable. En este método no es necesario que las áreas de la configuración sean planas; pueden ser convexas, cóncavas o tener cualquier forma irregular. En cualquier arreglo, el primer paso es unir los extremos de todas las superficies con cuerdas firmemente tensas, las cuales se pueden indicar por medios de rectas punteadas sobre el diagrama; posteriormente determinar la distancia de las cuerdas usando trigonometría y geometría analítica, finalmente, cualquier factor de visión para la distribución estudiada puede ser calculado mediante la Ecuación 2.9.

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{\sum (\text{Cuerdas cruzadas}) - \sum (\text{Cuerdas no cruzadas})}{2 \cdot (\text{Cuerda sobre la superficie } i)} \quad (2.9)$$

### **Método de radiación neta en recintos cerrados**

El método de radiación neta en recintos cerrados es adecuado para el análisis de radiación según comentan Cengel (2003), Siegel y Howell (2002); solo se debe conocer la temperatura ( $T$ ) o la velocidad neta de transferencia de calor por radiación ( $\dot{Q}$ ) para cada una de las superficies con el objetivo de hallar una solución para las temperaturas de superficie ( $T$ ) y las velocidades de transferencia de calor ( $\dot{Q}$ ) desconocidas. Desarrollando las Ecuaciones 2.10 y 2.11 para un recinto cerrado de  $N$  superficies se obtiene un sistema de  $N$  ecuaciones no lineales. Una vez que se dispone de las radiosidades  $J_1, J_2, \dots, J_N$  (definido como la

energía total de radiación que sale de una superficie por unidad de tiempo y de área) se pueden determinar las velocidades desconocidas de la transferencia de calor con base en la Ecuación 2.11, en tanto que las temperaturas superficiales desconocidas se pueden determinar a partir de la Ecuación 2.10. Un valor positivo para  $\dot{Q}_i$  indica transferencia neta de calor por radiación desde la superficie  $i$  hacia las otras superficies del recinto, en tanto que un valor negativo indica transferencia de calor por radiación hacia la superficie.

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (2.10)$$

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (2.11)$$

Donde:

$\dot{Q}_i$  = Tasa Neta de Transferencia de Calor por Radiación

$A_i$  = Área Superficial

$N$  = Número Total de Superficies

$F_{i \rightarrow j}$  = Factor de Visión entre las Superficies  $i$ - $j$

$J_i$  = Radiosidad

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann  $\left( 5.57 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$

$T_i$  = Temperatura Absoluta

$\varepsilon_i$  = Emisividad

## **2.4 Metodología de superficie de respuesta (MSR)**

Una investigación científica está íntimamente ligada con la experimentación, por ello se requiere incorporar una estrategia que permita decidir que experimentos llevar a cabo y como interpretar los resultados. Llevar a cabo una buena planeación experimental aumentará la probabilidad de alcanzar el objetivo en

menor tiempo, obtener conclusiones confiables y disminuir la posibilidad que se ignoren variables importantes (Lawson y col., 1992). Existen tres estrategias principales: el apaga fuegos, un factor a la vez y el diseño de experimentos, las dos primeras no requieren de conocimiento estadístico, siendo ineficientes en la recopilación y análisis de los datos.

El diseño estadístico de experimentos es un proceso para planear el experimento de tal forma que se recaben los datos apropiados, además que se puedan analizar con métodos estadísticos que lleven a conclusiones válidas y objetivas. El enfoque estadístico del diseño experimental es necesario si se esperan conclusiones significativas de los datos. Cuando el problema incluye mediciones que están sujetas a errores experimentales, la metodología estadística es el único enfoque objetivo de análisis. Por lo tanto, cualquier problema experimental incluye dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos. Estos dos aspectos se encuentran íntimamente relacionados pues el método de análisis depende directamente del diseño empleado (Gutiérrez y De la Vara, 2004).

Castaño y Domínguez (2003) explican que un buen diseño es aquel donde las condiciones seleccionadas y manipuladas en el experimento no están confundidas con variables extrañas referentes al material experimental y a su manejo en los ensayos, al ambiente o al tiempo; esas variables de ruido son entendidas plenamente en sus interacciones con las condiciones seleccionadas. De manera inversa, un mal diseño es aquel en que las condiciones seleccionadas y manipuladas son confundidas de manera desconocida o no se utilizan adecuadamente las interacciones con una o más variables de ruido. Muchos experimentos son defectuosos porque concluyen erróneamente a partir de diseños experimentales incorrectos, y en ocasiones, por el mal uso de los métodos estadísticos. Lo anterior es frecuente en los investigadores inexpertos, ya que si el diseño es bueno, generalmente los errores en el uso de métodos estadísticos pueden ser corregidos; por el contrario, el uso de métodos estadísticos válidos no pueden salvar un experimento que tenga problemas conceptuales o de diseño.

En Box y col. (2002) se establece que para un científico es posible realizar una investigación sin estadística, pero es imposible para un estadístico hacerla sin el conocimiento científico apropiado. Sin embargo, es mucho mejor que el científico utilice métodos estadísticos. Aun cuando los datos científicos no contengan ruido (es decir, no sufran ninguna perturbación causada por un control incompleto del entorno del experimento o por errores de medida), inducir conocimiento de sistemas complejos es muy difícil, más aun sino se cuenta con una metodología experimental que ayude a tratar con los errores experimentales. En estas circunstancias se aprovechará mejor la inteligencia y el conocimiento del investigador sobre el tema, si se dispone de herramientas estadísticas que sean:

1. Métodos eficientes de diseño de experimentos, que permitan obtener respuesta a preguntas que sean lo menos ambiguas y lo menos afectadas por errores aleatorios, por ejemplo, la Metodología de Superficie de Respuesta.
2. Equipo calificado para realizar análisis de sensibilidad en los datos.

Box (1999) enuncia que la metodología de superficie de respuesta es un grupo de técnicas estadísticas diseñadas específicamente como catalizador del aprendizaje científico. Gutiérrez y De la Vara (2004) definen la misma metodología como una estrategia experimental y de modelación que permite encontrar condiciones de operación óptima de un proceso para mejorar la calidad de un producto. Myers y Montgomery (2002) dicen que son un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas útiles para desarrollar, mejorar y optimizar procesos y/o productos. Es claro que si se continúa enunciando definiciones, todas concuerdan en que la metodología de superficie de respuesta tiene importantes aplicaciones en el diseño, desarrollo y formulación de nuevos productos. Un problema común para los científicos es poder predecir una respuesta  $y$  a partir de algunas variables independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , sin embargo, en sistemas donde la relación entre la  $y$  y las  $x$ 's no es claramente representada por modelos mecanicistas mediante

principios físicos, químicos o de ingeniería; una aproximación experimental es una adecuada estrategia de solución.

### **Definiciones básicas**

La aleatorización, repetición y el bloqueo son los tres principios básicos del diseño de experimentos. La aleatorización consiste en hacer corridas experimentales en orden aleatorio y con material seleccionado aleatoriamente. Con lo anterior se acrecienta la probabilidad de que el supuesto de independencia para los residuales se cumpla. Además, favorece en que las pequeñas diferencias provocadas por materiales, equipos y factores no controlados se repartan de manera homogénea en todos los tratamientos. Un ejemplo de la violación de éste principio se manifiesta cuando el resultado obtenido en una corrida del proceso se haya influenciado por la corrida que le precede.

La repetición significa correr más de una vez un tratamiento o combinación de factores. No confundir este principio con medir varias veces el mismo producto o artículos fabricados de una sola vez en cierta combinación de factores. Repetir es volver a correr el proceso. Las repeticiones permiten distinguir que parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cual a los factores. Cuando no se hacen repeticiones no existe modo de estimar la variabilidad natural o error aleatorio y esto dificulta la construcción de estadísticas. El repetir aumenta la confiabilidad de las mediciones, ya que las reproducciones en el mismo tratamiento serán razonablemente parecidas, principalmente cuando el proceso se encuentra en control estadístico.

El principio de bloqueo consiste en nulificar el efecto de ciertos factores que puedan afectar la respuesta observada. El nombre se deriva de experimentos agrícolas en los cuales se controla el efecto de parcela (bloque) al comparar varios tratamientos. Al bloquear se supone que el subconjunto de datos que se obtengan dentro de cada bloque (nivel particular del factor bloqueado) deben resultar más

homogéneos que el conjunto total de datos. Empleando adecuadamente el principio de bloqueo se logra mayor precisión en el análisis del experimento, pues al disminuir la variabilidad no explicada por los factores estudiados, el error aleatorio será mejor estimado.

Los factores son las variables independientes del fenómeno a estudiar. Estos pueden ser cualitativos o cuantitativos.

Los niveles son los diferentes valores que se asignan a cada factor del diseño experimental. Una combinación de niveles de todos los factores se llama tratamiento o punto de diseño.

La respuesta es una cantidad medible cuyo valor se ve afectado al cambiar los niveles de los factores. El principal interés es optimizar dicho valor.

La unidad experimental se define como la muestra de artículos que es necesario producir en una condición para obtener una medición o dato representativo.

La región experimental particulariza el contorno de valores para los niveles de los factores. Esto se puede hacer especificando los niveles actuales de operación para cada factor; si se desea explorar el vecindario se incrementa y decrementa el valor del nivel en una cantidad determinada.

### **Diseños experimentales para ajustar superficies de respuesta**

El ajuste y análisis de una superficie de respuesta se facilita con la elección apropiada de un diseño experimental. Los diseños de superficie de respuesta se clasifican de acuerdo al grado del modelo que se pretende utilizar. El nombre de diseños de superficie de respuesta es porque el objetivo es describir el comportamiento de la respuesta con un modelo de regresión, el cual define una



superficie sobre la región experimental. Después se analiza dicha superficie con técnicas de optimización que también se clasifican de acuerdo al modelo y que permiten localizar puntos en la dirección óptima de movimiento, el mejor punto posible dentro de la región experimental, o bien, el tratamiento óptimo cuando existe.

Autores como Castaño y Domínguez (2003), Gutiérrez y De la Vara (2004), y Montgomery (2001) sugieren algunas propiedades deseables en los diseños para la MSR:

1. Que se genere una distribución satisfactoria de la información sobre la región experimental. Los diseños más utilizados son puntos distribuidos en forma uniforme sobre la región experimental, o cuando menos tienen alguna simetría respecto al centro de ésta.
2. El diseño debe requerir un mínimo de pruebas, ya que en cada ensayo que se realiza se gastan recursos que siempre son escasos.
3. El diseño debe permitir que otros arreglos de orden mayor puedan construirse a partir del él. Cuando el proceder de la respuesta resulta ser más complicado de lo que se pensaba (detección de curvatura, por ejemplo), se agregan puntos adicionales al diseño para tratar de explicar ese comportamiento. Muchos diseños complicados se construyen a partir de unos más simples.
4. Se debe permitir detectar la falta de ajuste de los modelos. Se dice que una ecuación no se ajusta bien cuando existen términos todavía no incluidos en el modelo que contribuyen de manera significativa a explicar la variabilidad de la respuesta. Para poder detectar la falta de ajuste en él, se necesitan repeticiones, al menos en el centro del diseño.

5. El diseño debe proporcionar un estimador puro de la varianza del error, lo que se logra con repeticiones al menos en el punto central. Esto permite dar intervalos de confianza más precisos para la respuesta predicha sobre el punto óptimo.

Otras dos propiedades deseables en los arreglos para superficie de respuesta son la ortogonalidad y la rotabilidad. Estas características aumentan la eficacia de los diseños que las poseen, en el sentido de que facilitan la interpretación de los parámetros estimados en el modelo y de la superficie de respuesta.

### **Método de escalamiento ascendente**

Frecuentemente, la estimación de las condiciones de operación óptimas están alejada del óptimo real; en éste caso se desea hallar rápidamente la vecindad del óptimo. Montgomery (2001) señala que el método de escalamiento ascendente es un procedimiento para recorrer secuencialmente la trayectoria de ascenso, que debe conducir en dirección del máximo aumento de la respuesta. Cuando una respuesta es del tipo “mientras más grande es mejor”, se tiene escalamiento ascendente; si lo que interesa es “mientras más pequeña es mejor”, se trata de escalamiento descendente. Aunque en esencia son las mismas reglas puesto que el escalamiento descendente se convierte en ascendente al cambiar los signos de los términos del modelo ajustado.

Un algoritmo propuesto por Gutiérrez y De la Vara (2004) es el siguiente:

1. A partir del conocimiento que ya se tiene del problema, seleccionar los niveles de los factores para así determinar la región de exploración.

2. Correr un diseño de primer orden (típicamente un diseño  $2^k$  completo o fraccionado quizás con puntos al centro) para explorar la región experimental determinada en la etapa anterior.
3. Ajustar un modelo de primer orden. Si la ecuación explica satisfactoriamente la variabilidad observada, continuar al siguiente paso, de lo contrario investigar por qué la falta de ajuste ¿Mucha variabilidad? ¿Curvatura? ¿Región más complicada? y proceder en consecuencia.
4. Con el modelo depurado y ajustado, determinar la trayectoria óptima de movimiento, a partir del centro del diseño. Suponiendo que el modelo ajustado es un plano, la mejor dirección de movimiento es perpendicular a las curvas de nivel, y obviamente la dirección opuesta es el peor sentido posible. Si se supone que interesa maximizar la respuesta, el rumbo óptimo es moverse en cada factor proporcionalmente a la magnitud de sus coeficientes en el modelo, tomando en cuenta su signo. Un coeficiente negativo indica que los niveles de prueba en el factor correspondiente irán decreciendo.
5. Decidir una longitud de paso en unidades codificadas y reales. Se recomienda utilizar escalones de movimiento unitario (en unidades codificadas) en el factor con mayor influencia, con lo que se asegura que los avances en los factores restantes serán de menor amplitud, y proporcional a sus coeficientes. Si se partiera de una variable de poca influencia, el paso correspondiente a otro de mayor influencia se puede disparar rápidamente hasta salirse de la región de operabilidad del proceso, lo que implica generar puntos sobre la dirección óptima que no se pueden llevar a cabo. Un avance unitario del factor de mayor influencia equivale a moverse en el factor correspondiente a intervalos de un medio de su rango de prueba en unidades originales. Una longitud de avance mayor se

considera como agresivo y puede tener riesgos, mientras que una longitud de paso menor se considera como una forma conservadora de proceder, que en algunos casos cuando se está experimentando a nivel proceso puede ser una buena opción. Una vez que se subordina al factor con mayor influencia y se determinó las longitudes de paso inicial para todos los factores, convertir estas distancias a unidades originales.

6. Determinar un mínimo de cuatro o cinco sitios (o los que se requieran) en la dirección óptima para experimentar en ellos; a partir de la condición central se suman las longitudes de paso correspondientes.
7. Probar el proceso en los puntos anteriores, hasta detectar un cambio en la tendencia ascendente dada por el plano. Para detectar el cambio se recomienda graficar número de puntos contra el valor de la respuesta (Y), cuando en la curva claramente deje de crecer el valor de Y, y empiece a decrecer, entonces ya no se debe seguir la dirección de búsqueda que se había establecido antes.
8. Determinar el centro de la nueva región experimental y volver a iniciar en el instrucción 1. Por lo general la base de la nueva región experimental es el último punto de la dirección óptima con la que se mantuvo la tendencia ascendente.

### **Regresión lineal múltiple**

Gutiérrez y De la Vara (2004) señalan que en muchas situaciones prácticas existen variables independientes que se sospecha que influyen o están relacionadas con una variable de respuesta Y, y por lo tanto será necesario tomarlas en cuenta si se quiere predecir mejor el comportamiento de Y. Por ejemplo, para explicar el consumo de electricidad en una casa habitación tal vez

sea necesario considerar el tipo de residencia, el número de personas que la habitan, la temperatura promedio de la zona, etcétera.

Sean  $X_1, X_2, \dots, X_k$  variables independientes, y sea  $Y$  la respuesta, entonces el modelo de regresión lineal múltiple con  $k$  variables regresoras es el polinomio de primer orden.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.12)$$

Donde los  $\beta_j$  son los parámetros del modelo que se conocen como coeficientes de regresión y  $\varepsilon$  es el error aleatorio, con media cero,  $E(\varepsilon) = 0$  y  $V(\varepsilon) = \sigma^2$ . Si en la Ecuación 2.12  $k = 1$ , es el caso de una regresión lineal simple y el modelo es una línea recta; si  $k = 2$ , tal ecuación representa un plano. En general, la Ecuación 2.12 representa un hiperplano en el espacio de  $k$  dimensiones, generado por las variables  $X_j$ .

El término lineal del modelo de regresión se emplea debido a que la Ecuación 2.12 es función lineal de los parámetros desconocidos  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ . Su interpretación es simple:  $\beta_0$  es la ordenada al origen, y  $\beta_j$  mide el cambio esperado en  $Y$  por un cambio unitario en  $X_j$  cuando el resto de las variables regresoras se mantienen fijas.

Es frecuente que en la práctica se requieran modelos de mayor orden para explicar el comportamiento de  $Y$  en función de las variables regresoras. Por ejemplo, suponer que se tienen dos variables independientes y que se sospecha que la relación entre  $Y$  y algunas de las variables independientes es cuadrática, por ello se requerirá un polinomio de segundo orden como modelo de regresión:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (2.13)$$

Éste también es un modelo de regresión lineal múltiple, ya que la Ecuación 2.13 es una función lineal de los parámetros desconocidos  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{22}$ . Pero además si

se define  $x_3 = x_1x_2$ ;  $\beta_3 = \beta_{12}$ ;  $x_4 = x_1^2$ ;  $\beta_4 = \beta_{11}$ ;  $x_5 = x_2^2$ ; y  $\beta_5 = \beta_{22}$ ; entonces la Ecuación 2.13 puede escribirse así:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \varepsilon \quad (2.14)$$

Así de ese modo, la Ecuación 2.14 tiene la misma forma que el modelo general de regresión lineal múltiple de la expresión (2.12).

Para estimar los parámetros de la regresión lineal múltiple se necesita contar con  $n$  datos ( $n > k$ ) que tiene la estructura descrita en la Tabla 2.1. Se aprecia que para cada combinación de valores de las variables regresoras,  $(x_{1i}, \dots, x_{ki})$ , se indica un valor para la variable dependiente,  $y_i$ .

**Tabla 2.1.-Estructura de los datos para la regresión**

<b>Y</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>...</b>	<b>X<sub>k</sub></b>
$y_1$	$x_{11}$	$x_{21}$	...	$x_{k1}$
$y_2$	$x_{12}$	$x_{22}$	...	$x_{k2}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$y_n$	$x_{1n}$	$x_{2n}$	...	$x_{kn}$

En términos de los datos, el modelo de regresión lineal múltiple puede escribirse de la siguiente manera:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_{1i} + \beta_2x_{2i} + \dots + \beta_kx_{ki} + \varepsilon_i \quad (2.15)$$

$$= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ji} + \varepsilon_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Al despejar los errores, elevándolos al cuadrado y sumando se obtiene la siguiente función:

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ji} \right)^2 \quad (2.16)$$

La Ecuación 2.16 depende de los parámetros  $\beta_j$ . Los estimadores de mínimos cuadrados para  $\beta_j$  se obtienen al minimizar los errores, es decir, minimizando S. Esto se logra si se deriva a S respecto a cada parámetro  $\beta_j$ ,  $\partial S / \partial \beta_j$ , ( $j = 0, 1, 2 \dots k$ ), las  $k + 1$  ecuaciones resultantes se igualan a cero. La solución de las  $k + 1$  ecuaciones simultaneas son los estimados de mínimos cuadrados,  $\beta_j$ .

El camino de estimación por mínimos cuadrados es más sencillo si se utiliza notación matricial. El modelo en términos de los datos, Ecuación (2.15) se puede escribir en notación matricial como:

$$y = x\beta + \varepsilon$$

Donde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

Se desea encontrar el vector de los estimadores de mínimos cuadrados  $\hat{\beta}$ , que minimice

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon = (y - x\beta)^T (y - x\beta) \\ &= y^T y - \beta^T x^T y - y^T x\beta + \beta^T x^T x\beta \\ &= y^T y - 2\beta^T x^T y + \beta^T x^T x\beta \end{aligned} \quad (2.17)$$

La Ecuación 2.17 se debe a que  $\beta^T x^T y$  es una matriz (1 x 1), y por tanto su transpuesta  $(\beta^T x^T y)^T = y^T x \beta$  es el mismo escalar. De aquí que los estimadores de mínimos cuadrados deben satisfacer la siguiente expresión:

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2x^T y + 2x^T x \hat{\beta} = 0 \quad (2.18)$$

Esto implica que:

$$x^T x \hat{\beta} = x^T y \quad (2.19)$$

Para resolver la igualdad en términos de  $\hat{\beta}$ , se multiplica por ambos lados de la Ecuación (2.19) la matriz inversa de  $x^T x$ , y se obtiene que el estimador de mínimos cuadrados de  $\beta$  es:

$$\hat{\beta} = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (2.20)$$

Por tanto el modelo ajustado esta dado por:

$$\hat{y} = x \hat{\beta} \quad (2.21)$$



## **Capítulo 3**

### ***Equipo y procedimiento experimental***

#### ***3.1 Introducción***

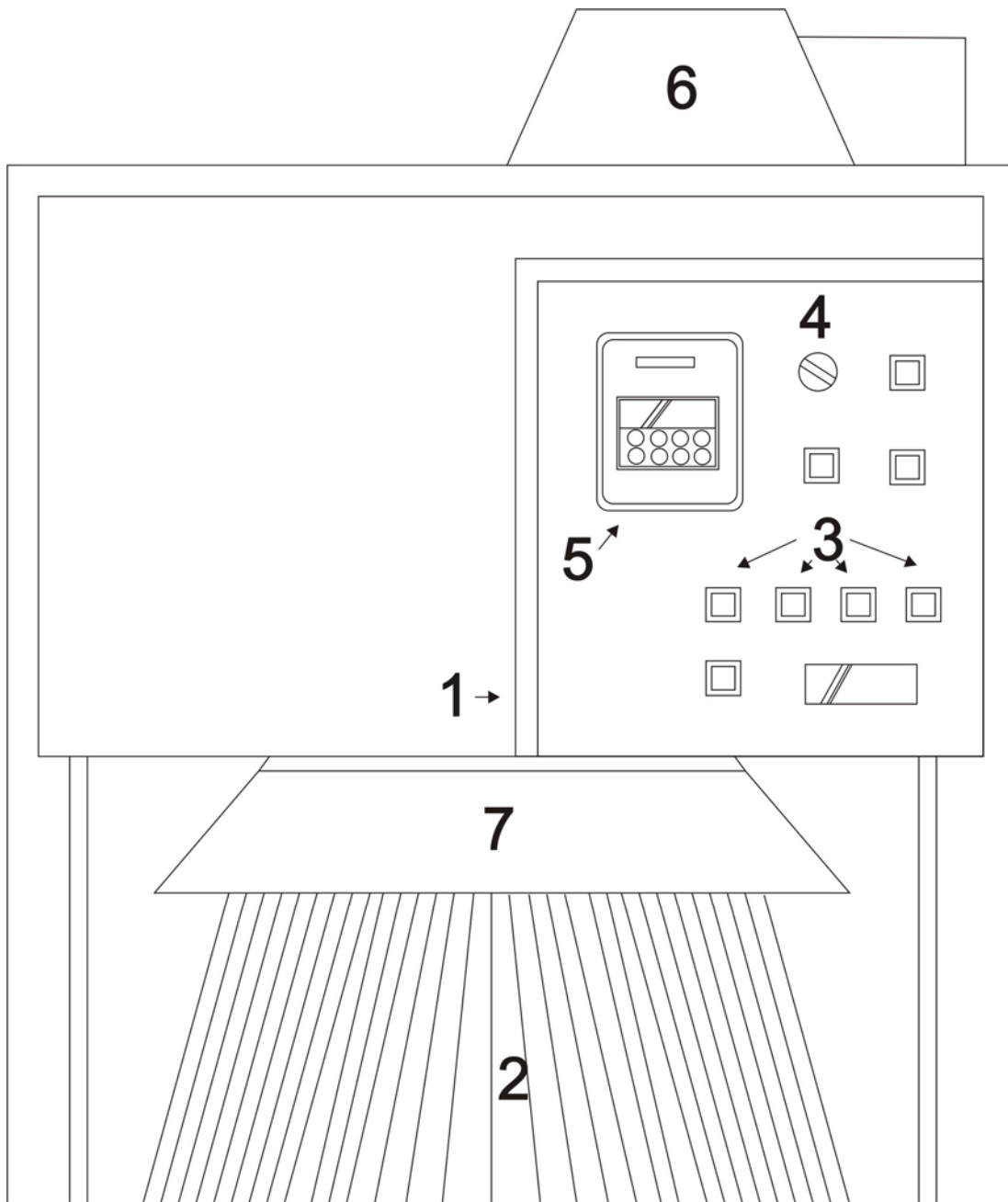
En el presente capítulo se discuten los aspectos relacionados con la descripción del prototipo para el secado por infrarrojo, la planeación experimental para la investigación, la metodología del procesamiento digital de imágenes que se uso en la medición del encogimiento de las probetas de cuero y las pruebas físicas que se realizaron al evaluar el efecto de la radiación infrarroja sobre la película de acabado.

Anteriormente, se tenía una idea equivocada acerca del papel que juega un estadístico en una investigación; se pensaba que únicamente debería involucrarse en el análisis de los datos, pero hoy en día es cierto que una buena planeación de los experimentos conducirá hacia resultados más objetivos.

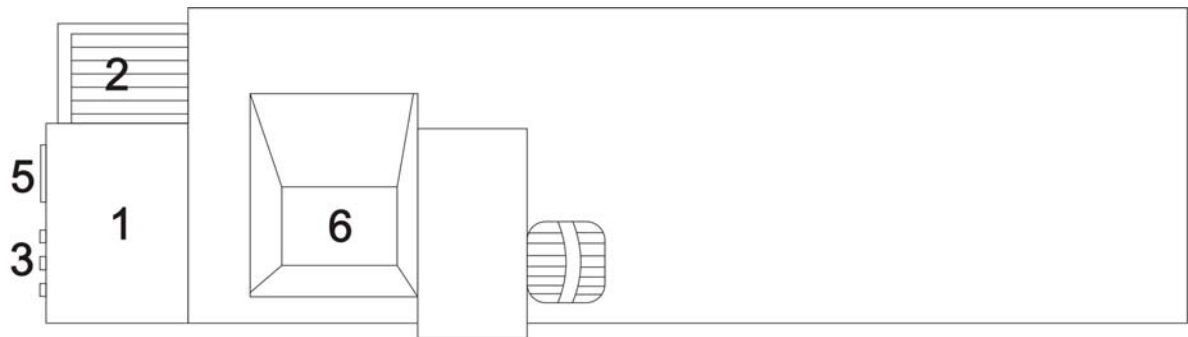
Las investigaciones exitosas requieren de experimentaciones eficientes para mejorar productos y/o desarrollar nuevos. Debido a que muchas veces los resultados del fenómeno se conocen rápidamente, el camino natural de un paradigma científico es conducir el aprendizaje a través de la alternancia inducción—deducción. Durante este proceso se pueden responder preguntas que aún se encuentran como interrogantes.

#### ***3.2 Descripción del prototipo***

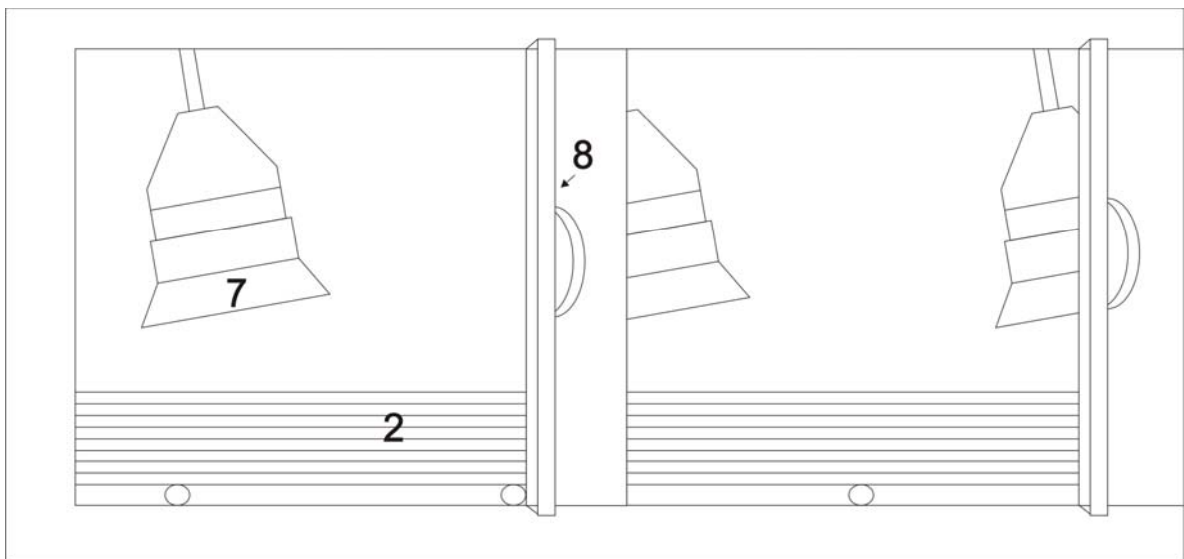
En las siguientes líneas se detalla el equipo que se utilizó para evaluar y eficientizar el secado de la película de acabado del cuero usando energía infrarroja. La descripción cita las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 cuyos componentes son referenciados con números arábigos.



**Figura 3.1.-Vista frontal del equipo de secado.**



**Figura 3.2.-**Vista superior donde se aprecia el panel de control (1), la banda transportadora (2) y el extractor (6).



**Figura 3.3.-**Vista lateral e interior del equipo de secado.

El acabado tiene como objetivo proporcionar al cuero protección contra daños mecánicos, humedad y suciedad, uniformizar los distintos cueros de una partida y otra, pero sobre todo otorgar mayor durabilidad al sustrato.

Hoy en día, existen tres técnicas principales para aplicar la formulación de acabado sobre la superficie externa del cuero: rodillos, cortina y pistolas. La primera se basa en el principio de la imprenta, cuenta con 3 elementos principales: un depósito de formulación, la banda guía y un par de rodillos. Desde el contenedor la solución fluye lentamente hacia el cilindro superior impregnándolo

totalmente, y una vez empapado basta con guiar el cuero entre los tambores para formar la película de acabado. El método de pistolas se fundamenta en el uso de aire para atomizar la formulación y poder dispersarla fácilmente sobre el cuero, un ejemplo son los rociadores para el pelo. Por último, en el procedimiento de cortina se hace pasar el cuero por debajo de un telón de líquido que desciende libremente, el material sobrante se recircula mediante una bomba.

Una vez formada la capa de acabado en el cuero empleando cualquier método de aplicación y según el concepto de estética y protección deseado, se coloca el sustrato sobre la banda transportadora (2), la cuál básicamente está constituida por una serie de cordones hechos de nylon que son resistentes a la temperatura de superficie de 982° C que alcanzan los cuatro paneles infrarrojos situados dentro del paso. El tiempo teórico de exposición dentro del túnel se calcula con un modelo matemático que puede ser usado para una variedad de gramos aplicados de material para acabado. El modelo obedece a las siguientes variables de operación: número de paneles infrarrojos encendidos, distancia del panel al sustrato y velocidad de la banda transportadora. Sin embargo, el desarrollo de un nomograma es muy práctico para el operador en planta, pues el trabajador únicamente buscará la intersección entre los gramos que se deseen evaporar y la velocidad de banda requerida para la evaporación (en el capítulo 4 se describen más detalladamente la construcción e interpretación de los nomogramas). El control de la velocidad se realiza por medio de botones (5) que se encuentran en el panel de control (1) representado en las Figuras 3.1, 3.2; controlando la frecuencia del motor se manipula su marcha y en consecuencia la velocidad de la banda transportadora. El prototipo usa un motor de corriente alterna cuya potencia nominal es de ½ Hp. El encendido de los paneles de infrarrojo y el sentido de giro se controlan con los interruptores (3) y (4), respectivamente, también situados en el panel de control (1). Los paneles infrarrojos trabajan de la siguiente manera: la flama de un quemador a gas calienta la cerámica cubierta con una delgada capa de óxido de acero (lo cual mejora la emisividad hasta en un 13 % según el fabricante). Cuando la cerámica alcanza un color rojo brillante la temperatura

sobre la superficie se halla en 982°C emitiendo mayoritariamente la radiación dentro de la región del infrarrojo cercano; debido a la combustión se producen gases en los quemadores, los cuales son desalojados al exterior por medio del extractor (6) consiguiendo liberar los excesos de bióxido de carbono del interior del equipo. La potencia del motor para el ventilador es de ¼ Hp monofásico. Además, se diseñó el túnel cerrado a los lados y en la parte superior para poder destinar la mayor cantidad de calor hacia el acabado del cuero cuya intención es secarlo; el mantenimiento del sistema consiste básicamente en la limpieza de los paneles y el túnel; lo anterior se facilita pues a los lados hay puertas de protección (8) las cuales son abatibles.

### **3.3 Planeación de la investigación**

Se llevo a cabo una evaluación del desempeño para el prototipo empleando la *metodología de superficie de respuesta*. Gutiérrez y De la vara (2004), y Myers y Montgomery (2002) sugieren que la técnica sea aplicada donde diferentes variables independientes influyan de alguna forma en el comportamiento de una respuesta o característica de calidad para un producto o proceso. Un modelo de superficie de respuesta es útil porque se deduce a partir de la experimentación, en lugar de usar un modelo mecanicista que en la mayoría de las ocasiones establecer la regla de correspondencia no es una tarea sencilla o bien no se conoce a detalle el fenómeno observado. Esta metodología sugiere una etapa de cribado o de exploración con el objetivo de cernir algunas variables que pudiesen no influir significativamente en la respuesta porcentaje de evaporación. A partir de una lluvia de ideas se decidió estudiar las variables: espacio entre paneles (E), velocidad de banda transportadora de cuero (B), distancia del panel infrarrojo al sustrato (C) y número de paneles encendidos (D). En la Tabla 3.1 se aprecia el diseño experimental elegido para la etapa de cribado; observar que el factor A se intentó mantener fijo en un intervalo de 3.24 +/- 0.15 grs. sin embargo, la máquina de rodillos empleada para administrar la formulación no tiene precisión y es difícil mantener la exactitud.

Para lograr un mayor conocimiento acerca del secado en distintas condiciones de material empleado sobre la superficie del cuero se decidió manipular el factor gramaje aplicado y con ello construir nomogramas que faciliten la operación del equipo (Tabla 3.2).

**Tabla 3.1.-Diseño experimental utilizado para el cribado.**

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
3.55	-1	-1	-1	-1
3.65	-1	-1	1	-1
3.33	1	-1	-1	-1
3.42	1	-1	1	-1
2.98	-1	-1	-1	1
3.38	-1	-1	1	1
3.23	1	-1	-1	1
3.45	1	-1	1	1
3.2	-1	1	-1	-1
2.87	-1	1	1	-1
2.34	1	1	-1	-1
3.38	1	1	1	-1
2.84	-1	1	-1	1
2.93	-1	1	1	1
2.78	1	1	-1	1
2.67	1	1	1	1
3.56	0	0	0	0
3.24	0	0	0	0
3.08	0	0	0	0
3.13	0	0	0	0
2.99	0	0	0	0

A = Gramaje de la película de acabado

B = Velocidad de banda transportadora de cuero (9.6, 11.2, 12.8 m/min)

C = Distancia del panel infrarrojo al sustrato (10, 16.5, 23 cm)

D = Número de paneles encendidos (2,3,4)

E = Distancia entre paneles infrarrojos (55, 82.5, 110 cm)

**Tabla 3.2.-Diseño experimental utilizado para estudiar la superficie de respuesta.**

Corrida	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	-1
4	-1	1	-1	1
5	-1	-1	1	-1
6	-1	-1	1	1
7	-1	1	1	-1
8	-1	1	1	1
9	1	-1	-1	-1
10	1	-1	-1	1
11	1	1	-1	-1
12	1	1	-1	1
13	1	-1	1	-1
14	1	-1	1	1
15	1	1	1	-1
16	1	1	1	1
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0

A = Gramaje de la película de acabado (3.32,6.14,8.18 gr)

B = Velocidad de banda transportadora de cuero (4,7.5,11 m/min)

C = Distancia del panel infrarrojo al sustrato (12,17.5, 23 cm.)

D = Número de paneles encendidos (2,3,4)

Observar que los niveles de las variables están en forma codificada para facilitar el análisis matemático-estadístico (-1 en nivel bajo, 0 nivel medio, 1 en nivel alto). Prestar atención que en esa matriz experimental no se incorpora la variable distancia entre paneles infrarrojos pues del estudio anterior se infirió que el efecto de ese factor no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del

99 % ya que el valor p es 0.4413. La anova respectiva se discutirá en el capítulo de análisis de resultados.

Según Gutiérrez y De la vara (2004), Myers y Montgomery (2002) un modelo de primer orden con repeticiones al centro es útil para pasar con rapidez a la vecindad general del punto óptimo. De ese modo, las matrices experimentales fueron arreglos factoriales de 16 corridas y 5 puntos al centro resultando un total de 21 tratamientos; con ello se pudieron alcanzar 10 grados de libertad para estimar el error aleatorio.

Es imprescindible comparar los resultados con las condiciones industriales. Por ello, se visitó una tenería recabando información sobre un horno típico por convección de 12 m de largo para el acabado del cuero hallando que en promedio únicamente el 68 % del agua aplicada es evaporada en esta clase de hornos. Para equiparar objetivamente ambas tecnologías de secado (infrarrojo vs convección) se realizaron experimentos adicionales usando el secador infrarrojo para evaporar exclusivamente el 70 % de agua aplicada en la formulación sin elevar la temperatura más de 80°C sobre la superficie del cuero dentro del túnel. Del conocimiento adquirido en estudios previos se decidió emplear 3 paneles infrarrojos, considerando cuatro factores: gramaje de la película (A), velocidad de transporte (B), y distancia de panel al sustrato para los dos últimos quemadores (C2, C3). Se mantuvo una distancia de 20 cm entre el primer quemador y las muestras de cuero mientras que se cambiaba la posición de los otros dos quemadores. En la Tabla 3.3 se aprecia el correspondiente arreglo experimental.

Después de estas primeras investigaciones y bajo la inquietud de mejora continua, se concibió un nuevo diseño para el secador por infrarrojo. La idea fue el resultado de observar una alta temperatura sobre las paredes laterales del horno. Una solución para aminorar las pérdidas de calor por radiación hacia los alrededores, fue instalar un material delgado y altamente reflejante (baja emisividad).



**Tabla 3.3.-Arreglo experimental para contrastar con secador por convección.**

<b>Corrida</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1	-1
3	-1	-1	1	-1
4	-1	1	1	-1
5	-1	-1	-1	1
6	-1	1	-1	1
7	-1	-1	1	1
8	-1	1	1	1
9	1	-1	-1	-1
10	1	1	-1	-1
11	1	-1	1	-1
12	1	1	1	-1
13	1	-1	-1	1
14	1	1	-1	1
15	1	-1	1	1
16	1	1	1	1
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0

A = Gramaje de película (3.9075, 5.608, 9.19125 gr)

B = Velocidad de transporte (5.76, 9.6, 13.44 m/min)

C2 = Distancia del panel 2 a el sustrato (14, 20, 26 cm)

C3 = Distancia del panel 3 a el sustrato (14, 20, 26 cm)

En la teoría de la radiación infrarroja, estos materiales son llamados escudos de radiación y sirven para reducir la temperatura de las paredes del horno, reflejando el calor hacia el sustrato. Cengel (2003), Siegel y Howell (2002) sugieren películas

metálicas hechas de aluminio, ya que poseen una baja emisividad (alrededor de 0.07).

Antes de conducir los experimentos se realizó un análisis teórico para comprobar la factibilidad de la innovación. Entre la bibliografía revisada se menciona que la velocidad de transferencia de calor por infrarrojo puede ser modelada usando el método de radiación neta para recintos cerrados (Cengel, 2003; Siegel y Howell, 2002; Mahan, 2002). Para ello, basta conocer la temperatura ó la razón neta de transferencia de calor para cada una de las superficies del recinto. Los cálculos son detallados en el capítulo 4.

**Tabla 3.4.-Arreglo experimental para evaluar los escudos de radiación.**

<b>Corrida</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	-1	-1
2	-1	1
3	-1	-1
4	-1	1
5	-1	-1
6	-1	-1
7	-1	1
8	-1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	-1
12	1	1
13	1	-1
14	1	-1
15	1	1
16	1	-1

A = Gramaje de película (3.99, 6.30 gr)

B = Velocidad de transporte (7.68, 15.36 m/min)

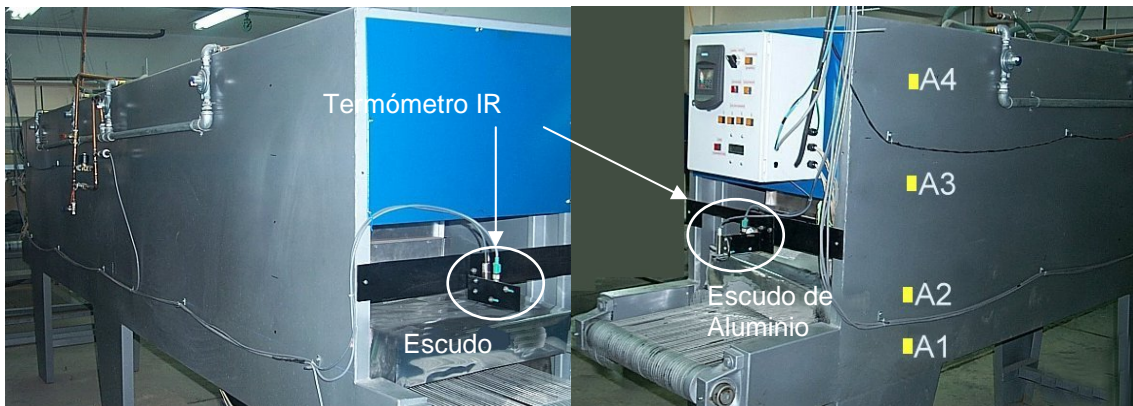
Para la nueva versión se construyó adentro del túnel un canal con forma trapezoidal hecho de lámina de aluminio. Como se dijo antes, esto se implementó para reducir las pérdidas de radiación infrarroja hacia los alrededores. La altura del canal es de 27 centímetros desde el panel de cerámica, y la distancia entre el

quemador y el sustrato se mantuvo en 20 centímetros; es decir, el escudo contra la radiación está 7 centímetros debajo de la banda transportadora.

Para evaluar el desempeño de la nueva versión del secador por infrarrojo, se eligieron las variables de respuesta: porcentaje de evaporación y temperatura de salida, siendo funciones de los factores: gramaje de la película (A) y velocidad de transporte (B). El diseño experimental es presentado en la Tabla 3.4. Se aprecia que es un diseño factorial completo de dos niveles con tres réplicas; el número total de corridas fueron 16 quedando 12 grados de libertad para estimar el error aleatorio.

Otra manera de valorar la eficacia de los escudos de radiación es mediante el monitoreo de la temperatura sobre las paredes del horno durante los primeros 15 minutos, cuando el incremento de la temperatura es importante. Se capturaron datos sobre cuatro diferentes puntos:

1. Área 1: 31 cm debajo del panel de cerámica,
2. Área 2: 14 cm debajo del panel de cerámica,
3. Área 3: 15 cm sobre el panel de cerámica,
4. Área 4: 44 cm sobre el panel de cerámica (Figura 3.4)



**Figure 3.4.**-Equipo experimental para el secado por infrarrojo a gas.

Para estudiar las variables de respuesta: porcentaje de evaporación, encogimiento de la probeta y temperatura de salida, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Medir el área vía procesamiento digital de imágenes.

2. Determinar el peso de la muestra de cuero.
3. Aplicar la película de acabado por medio de la máquina de rodillos.
4. Determinar el peso inmediatamente después de la aplicación.
5. Medir la temperatura en la entrada del túnel.
6. Secar la probeta en el túnel de infrarrojo.
7. Medir la temperatura a la salida del túnel.
8. Determinar el peso de la muestra de cuero con acabado justamente después de la salida del túnel.
9. Medir el área vía procesamiento digital de imágenes.

Sirviéndose de la Ecuación 3.1 se calcula el porcentaje de evaporación.

$$\% \text{ evaporación} = \left( \frac{[PC \text{ entrada} - PC] - [PC \text{ salida} - PC]}{(1 - \% \text{ sólidos})(PC \text{ entrada} - PC)} \right) * 100 \quad (3.1)$$

Donde:

*PC* = Peso del cuero.

*PC entrada* = Peso del cuero con la formulación aplicada a la entrada del túnel.

*PC salida* = Peso del cuero a la salida del túnel.

% sólidos = Porcentaje de sólidos de la formulación utilizada.

Se emplearon unidades experimentales de cuero curtido al cromo para uso automotriz, identificadas por el fabricante como Dakota Negro. La formulación de acabado base agua, proporcionada por Together for Leather (TFL), estuvo constituida por 2 resinas acrílicas, pigmento negro, filler y una viscosidad modificada con un total de 28 % de sólidos.

### **3.4 Procesamiento digital de imágenes**

La moderna tecnología digital ha hecho posible la manipulación de imágenes permitiendo numerosas aplicaciones, como la realizada en el presente trabajo.

La técnica usada permite aplicar algoritmos adecuados a la imagen digital a fin de poder determinar un sinnúmero de propiedades, ya que la vista distingue, en las mejores ocasiones, entre 20 y 25 tonos de grises, mientras que la computadora capta 255 tonos, siendo cada uno de estos un número. En consecuencia la imagen es operable matemáticamente arrojando productos finales que a simple vista no se pueden identificar.

Suponer que se desea conocer al área de una flor mostrada en la Figura 3.5 (izquierda), la cual es una superficie irregular donde no es sencillo manejar técnicas tradicionales. El primer paso sería capturar la imagen mediante una cámara fotográfica, donde la calidad del cuadro dependerá del número de píxeles de ésta. A continuación se usa una computadora para digitalizar la fotografía, es decir, cada tono de la imagen se transformará en una cifra entre 0 y 255.



**Figura 3.5.-Ejemplo para medir área mediante PDI.**

Posteriormente, empleando algoritmos de procesamiento digital de imágenes (PDI), se convierte cada píxel de la imagen en colores básicos negro y blanco. Por último, se establece el número de píxeles de cada tipo y calibrando correctamente el sistema es factible cuantificar la superficie de un cuerpo.

Para determinar la superficie de las muestras de cuero se hizo algo muy similar al ejemplo de la Figura 3.5. El encogimiento de las probetas es el cociente del área en la salida del túnel de secado y el área antes de pasar por él.

### ***3.5 Pruebas físicas para el acabado del cuero***

En la dirección electrónica de cueronet (2006) se dice que la garantía de calidad del acabado es un objetivo prioritario para los directivos de las fábricas de curtidos, ya que de ella depende la supervivencia de estas empresas.

Font (2004) sugiere tres diferentes pruebas de calidad para el acabado del cuero: flexión, fricción y adherencia. La primera representa la durabilidad del acabado sin sufrir daño durante su uso, la segunda comprueba la resistencia al frote imitando el rozamiento de la ropa sobre el sustrato y la última mide la fuerza necesaria para despegar el acabado del cuero.

El procedimiento para realizar el experimento de flexión se describe en la norma NRF-008-PEMEX-2001: cortar cuatro muestras rectangulares de aproximadamente 4.5 cm x 7 cm cada una, identificarlas, dos para las pruebas en seco y dos para los ensayos en húmedo.

Colocar las muestras para los intentos en húmedo dentro de un recipiente con agua destilada durante 10 min, confirmar que los aditamentos flexionantes estén paralelos a la base del aparato y verificar que el contador esté en cero.

Poner la muestra en un flexometro como el mostrado en la Figura 3.6, y observarla a las 100, 1000, 10 000, 18 000, 20 000, 40 000 y 50 000 flexiones. Obtener el promedio para cada uno de los especímenes probados en seco y en húmedo.

Esta prueba se considera satisfactoria si el promedio cumple con los 50 000 ciclos (mínimo) en seco y 18 000 ciclos (mínimo) en húmedo.

El acabado del cuero no debe presentar agrietamientos después de haberle aplicado el número de ciclos de flexión que se especificaron.



**Figura 3.6.-**Equipo para la prueba de flexión.

Con los ensayos de frote, se evalúa cual puede ser el comportamiento de la superficie del cuero al someterla a la acción de agentes que la friccionan de forma más o menos enérgica.

Para llevar a acabo esta prueba, se corta una muestra rectangular de aproximadamente 2 cm x 3 cm, y se identifica.

Se coloca la muestra para los intentos de cuero seco-fieltro seco, cuero húmedo-fieltro seco, y cuero seco-fieltro húmedo en la máquina de frote, Figura 3.7, la probeta se observará cada 5 roces en los tres tipos de fricción. Verificar que el contador esté en cero, y se finalizan los ensayos cuando el total de ciclos sea de 150.

El acabado del cuero no debe presentar ninguna señal de desgaste posteriormente de haberle aplicado el siguiente número de ciclos:

- Cuero seco-fieltro seco 20 ciclos
- Cuero húmedo-fieltro seco 25 ciclos
- Cuero seco-fieltro húmedo 25 ciclos



**Figura 3.7.-**Equipo para la prueba de fricción.

Finalmente, la prueba de adherencia es la fuerza requerida para arrancar el acabado del cuero, aplicando una fuerza continua en un ángulo recto con respecto a un soporte rígido al que se ha pegado el cuero por el lado acabado.

Para realizar el ensayo, la probeta con 1 cm de ancho y 3.5 cm de largo (previamente identificada) se adhiere a un soporte plano de PVC rígido al que anticipadamente se le ha aplicado un adhesivo. El soporte está firmemente unido a la mordaza inferior de un dinamómetro que se encuentra en posición horizontal (Figura 3.8). La tira de cuero se pega de forma que resulte libre, aproximadamente 15 mm desde el borde del soporte rígido. En el extremo que sobresale se hace un orificio de 2-3 mm de diámetro por el que se introduce un gancho fijado a la mordaza superior del dinamómetro. Cuando el instrumento se pone en marcha éste aplica una fuerza ascendente que tira el cuero hacia arriba obligándole a desprenderse del acabado, el cual permanece retenido en el soporte conjuntamente con la película de adhesivo. El ensayo se finaliza cuando se desprenda la película de acabado del sustrato, en este instante se registra la fuerza que soportó el acabado.



La pauta de calidad aconsejable es:

- Cuero flor entera 2.94 N / cm mínimo
- Cuero flor corregida 5.88 N / cm mínimo
- Charol 3.92 N / cm mínimo



**Figura 3.8.-**Equipo para la prueba de adherencia.

## **Capítulo 4**

### ***Análisis y discusión de resultados***

#### ***4.1 Introducción***

En el presente capítulo se analiza a detalle los logros experimentales de la investigación, se contrastan las conjeturas iniciales con los resultados de los ensayos dando origen a modelos que conducen a nomogramas útiles para el curtidor mexicano.

Las diferentes tablas de análisis de varianza presentadas sirven para separar la variación total en las partes con la que contribuye cada fuente de variación en el experimento, y con ello, determinar la significancia del efecto estudiado.

Por otra parte, sobre un perfil de temperatura del secador por infrarrojo se muestra el cambio de temperatura en cada panel para diferentes valores de la respuesta porcentaje de evaporación.

Para mejorar la eficiencia energética, una nueva versión de diseño fue concebida. Se instalaron unos escudos de radiación dentro del túnel de secado, los cuales indudablemente permitieron concentrar más calor hacia la superficie del sustrato. También se realizó un balance de calor del prototipo el cual estima la eficiencia energética del mismo.

En definitiva, se comparó el secador por convección e infrarrojo consiguiendo ventajas en tamaño, tiempo de residencia y consumo de gas en favor de la actual innovación.

#### ***4.2 Análisis de varianza de los experimentos realizados***

##### **Diseño experimental inicial**

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados para las variables estudiadas (porcentaje de evaporación, temperatura de salida y porcentaje de encogimiento). Sobre algunos puntos experimentales el porcentaje de evaporación se halla por encima del 100 %, valor ideal (se evapora toda el agua utilizada como vehículo en

la formulación). Esto ocurre porque las condiciones de experimentación se hallaron en valores extremos para esa variable; al obtener esos datos se logró estudiar más ampliamente la superficie de respuesta.

**Tabla 4.1.-Diseño experimental utilizado para el cribado.**

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>Evaporación %</b>	<b>Temp. salida °C</b>	<b>Encogimiento %</b>
3.55	-1	-1	-1	-1	63.95	47.8	0.6313
3.65	-1	-1	1	-1	107.60	70.4	1.7175
3.33	1	-1	-1	-1	57.30	49.4	0.3503
3.42	1	-1	1	-1	88.37	67.8	0.7298
2.98	-1	-1	-1	1	69.17	54.4	0.8877
3.38	-1	-1	1	1	115.38	93.1	1.4912
3.23	1	-1	-1	1	59.50	55.6	0.6217
3.45	1	-1	1	1	90.83	87.8	1.1702
3.2	-1	1	-1	-1	54.40	53.8	0.6413
2.87	-1	1	1	-1	100.94	66.6	0.9727
2.34	1	1	-1	-1	55.95	47.2	0.4809
3.38	1	1	1	-1	70.05	60.4	0.6511
2.84	-1	1	-1	1	54.44	44.6	0.2804
2.93	-1	1	1	1	93.17	65.8	0.5189
2.78	1	1	-1	1	50.10	45.8	0.2949
2.67	1	1	1	1	83.46	97.1	0.5287
3.56	0	0	0	0	66.90	57.4	0.4495
3.24	0	0	0	0	70.50	59.2	0.5813
3.08	0	0	0	0	81.85	60.2	0.5456
3.13	0	0	0	0	75.64	62.4	0.7206
2.99	0	0	0	0	79.65	59	0.2071

Factor A = Gramaje de la película de acabado 3.14286 +/- 0.151013 gr

Factor B = Velocidad de banda transportadora del cuero (9.6,11.2,12.8 m/min)

Factor C = Distancia del panel infrarrojo al sustrato (10,16.5, 23 cm)

Factor D = Número de paneles encendidos (2, 3, 4)

Factor E = Distancia entre paneles infrarrojos (55, 82.5, 110 cm)

Apreciar que cuando el porcentaje de evaporación aumenta, la temperatura de salida y el porcentaje de encogimiento igualmente se incrementan (Figura 4.1).

En la Tabla 4.2 se indica que la velocidad de transporte (B), la distancia del panel al sustrato (C), el número de paneles encendidos (D) y la interacción velocidad de transporte-número de paneles encendidos (BD), reflejaron ser estadísticamente

significativas con un nivel de confianza del 98 %. La interacción BD se puede interpretar de la siguiente forma: si se emplean 2 quemadores (nivel -1) cualquier cambio en la velocidad de la banda transportadora, aumentar o disminuir la rapidez, no modifica significativamente el porcentaje de evaporación (observar la inclinación de la recta inferior de la Figura 4.2). Esto no ocurre si se instalan 4 quemadores (nivel 1); en esas circunstancias la pendiente es mayor, lo que denota una mayor influencia sobre el porcentaje de evaporación.

**Tabla 4.2.-Anova para el porcentaje de evaporación de la Tabla 4.1.**

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>G.L.</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>Valor-p</b>
<b>B: Velocidad de transporte</b>	669.265	1	669.265	22.53	0.0008
<b>C: Distancia Panel-sustrato</b>	501.803	1	501.803	16.89	0.0021
<b>D:# paneles</b>	5076.19	1	5076.19	170.86	0.0000
<b>E: Distancia entre Paneles</b>	19.0985	1	19.0985	0.64	0.4413
<b>BC</b>	17.444	1	17.444	0.59	0.4612
<b>BD</b>	266.226	1	266.226	8.96	0.0135
<b>BE</b>	3.04145	1	3.04145	0.10	0.7556
<b>CD</b>	23.8398	1	23.8398	0.80	0.3914
<b>CE</b>	19.8864	1	19.8864	0.67	0.4323
<b>DE</b>	12.7177	1	12.7177	0.43	0.5277
<b>Error Total</b>	297.104	10	29.7104		
<b>Total (corr.)</b>	6906.62	20			

R-Cuadrada = 95.6983 %

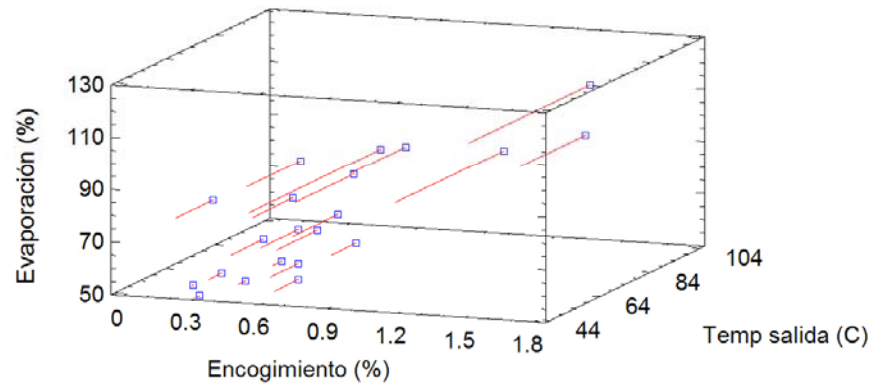
R-Cuadrada (ajustada para g.l.) = 91.3965%

Error estándar de Est. = 5.45072

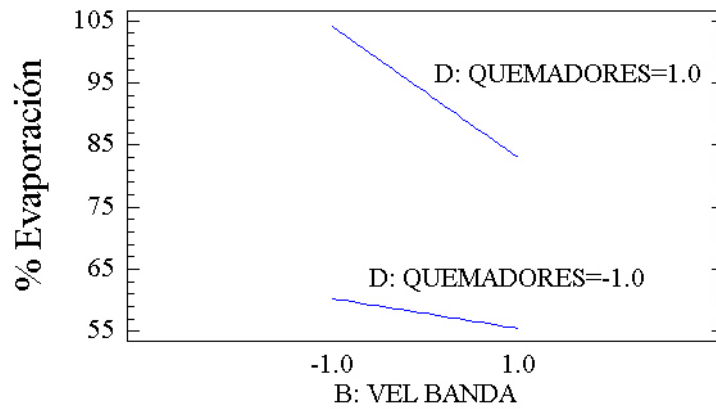
Promedio absoluto del error = 3.00041

Una interesante conclusión de la anova (Tabla 4.2) fue la inferencia que el efecto del factor distancia entre paneles no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 99 % pues el valor p es 0.4413; dicho en otras palabras, la

posición de los emisores infrarrojos sobre la horizontal dentro del túnel de 4 m de largo (espacio máximo entre paneles 110 cm) no afectó el sistema de secado.



**Figura 4.1.-**Gráfica tridimensional para las respuestas de la Tabla 4.1.



**Figura 4.2.-**Gráfica de interacción BD para la Tabla 4.2.

## **Diseño experimental con gramaje de película incluido**

Deese (2005) dice que cualquier líquido está formado por moléculas, las cuales constantemente se hallan en movimiento, viajando a diferentes velocidades. La velocidad promedio depende de su temperatura, en consecuencia, las partículas con mayor energía cinética son las que primeramente dejan la superficie, convirtiéndose en moléculas de vapor de agua. De este modo, si se desea evaporar una cantidad específica de agua, se le deberá transmitir calor proporcionalmente al total de materia por evaporar.

Comprendido lo anterior, se decidió estudiar el secado bajo distintas cantidades de material para el acabado, de esta manera se consigue generalizar los resultados para cualquier método de aplicación (rodillos, pistolas o cortina). El factor gramaje aplicado se manipuló desde 3.32 hasta 8.18 grs. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3. La variable porcentaje de evaporación tiene un rango de 28 a 255 % (el objetivo es 100 %). Nuevamente, ese amplio intervalo es debido a las condiciones de operación establecidas en el diseño experimental. El objetivo fue estudiar escenarios cambiantes (superficie de respuesta) de tal manera que se pudiese deducir un modelo. Observar que un porcentaje de evaporación por encima del objetivo provoca un encogimiento mayor, por ello se aconseja no secar más del 100 % del agua aplicada en la formulación (Figura 4.3). En los puntos experimentales donde el porcentaje de encogimiento fue despreciable, éste se permutó por el valor de cero.

El análisis de varianza que explica adecuadamente la variabilidad del porcentaje de evaporación se indica en la Tabla 4.4. A partir de ésta, se concluye que todos los factores principales son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 99 %, sólo hay una interacción estadísticamente significativa en un nivel de confianza del 95 %; sin embargo, cuatro interacciones (AB, AD, BC y BD) han sido consideradas debido a que contribuyen, en su conjunto, a explicar la variación del porcentaje de evaporación y disminuir el error promedio absoluto en 12.1061: Dicho de otra manera, el estadístico R-cuadrada indica que el modelo

ajustado explica el 92.8139 % de la variabilidad en el porcentaje de evaporación, un ajuste idóneo sería 100 %. La Figura 4.4 presenta la interacción AB donde se aprecia que sí la velocidad de la banda se sintoniza en el nivel bajo (4.7 m/min), un incremento en los gramos aplicados conlleva a un notable cambio en el porcentaje de evaporación; contrariamente, esa misma respuesta es relativamente insensible cuando la velocidad se sitúa en nivel alto (11 m/min) y ocurren modificaciones en los gramos aplicados.

**Tabla 4.3.-Diseño experimental utilizado para estudiar la superficie de respuesta.**

Corrida	A	B	C	D	Evaporación %	Encogimiento %	Temp salida ° C
1	-1	-1	-1	-1	159.26	1.07	46.6
2	-1	-1	-1	1	255.80	2.84	77.6
3	-1	1	-1	-1	57.56	0.00	49.6
4	-1	1	-1	1	95.44	0.00	73.6
5	-1	-1	1	-1	85.68	0.00	42.6
6	-1	-1	1	1	188.51	0.61	70.4
7	-1	1	1	-1	46.39	0.00	43.2
8	-1	1	1	1	77.62	0.00	67.4
9	1	-1	-1	-1	72.60	0.29	52.2
10	1	-1	-1	1	116.03	1.78	78.2
11	1	1	-1	-1	30.66	0.00	39.4
12	1	1	-1	1	62.18	0.00	62.2
13	1	-1	1	-1	58.75	0.06	42
14	1	-1	1	1	101.37	0.76	68
15	1	1	1	-1	28.80	0.00	36.4
16	1	1	1	1	44.09	0.12	47.8
17	0	0	0	0	64.55	0.03	59.8
18	0	0	0	0	74.33	0.26	59.4
19	0	0	0	0	64.77	0.24	56
20	0	0	0	0	58.62	0.32	57.6
21	0	0	0	0	58.34	0.24	60.4

Factor A = Gramaje de la película de acabado (3.32, 6.14, 8.18 grs)

Factor B = Velocidad de banda transportadora del cuero (4, 7.5, 11 m/min)

Factor C = Distancia del panel infrarrojo al sustrato (12, 17.5, 23 cm)

Factor D = Número de paneles encendidos (2, 3, 4)

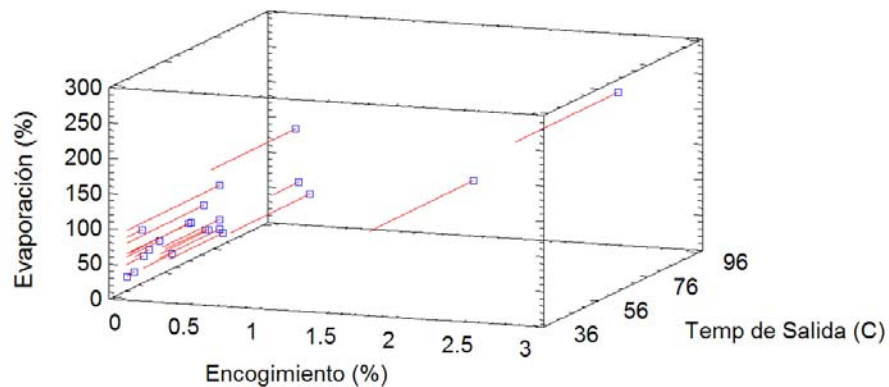


Figura 4.3-Gráfica tridimensional para las respuestas de la Tabla 4.3.

Tabla 4.4.-Anova para el % evaporación de la Tabla 4.3.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	F	Valor-p
<b>A: Gramaje aplicado</b>	13720.8	1	13720.8	37.86	0.0000
<b>B: Velocidad de transporte</b>	21600.7	1	21600.7	59.60	0.0000
<b>C: Distancia Panel-sustrato</b>	3410.57	1	3410.57	9.41	0.0098
<b>D:# paneles</b>	8607.3	1	8607.3	23.75	0.0004
<b>AB</b>	3420.84	1	3420.84	9.44	0.0097
<b>AD</b>	1545.18	1	1545.18	4.26	0.0613
<b>BC</b>	1308.41	1	1308.41	3.61	0.0817
<b>BD</b>	1308.63	1	1308.63	3.61	0.0817
<b>Error total</b>	4349.28	12	362.44		
<b>Total (corr.)</b>	60523.7	20			

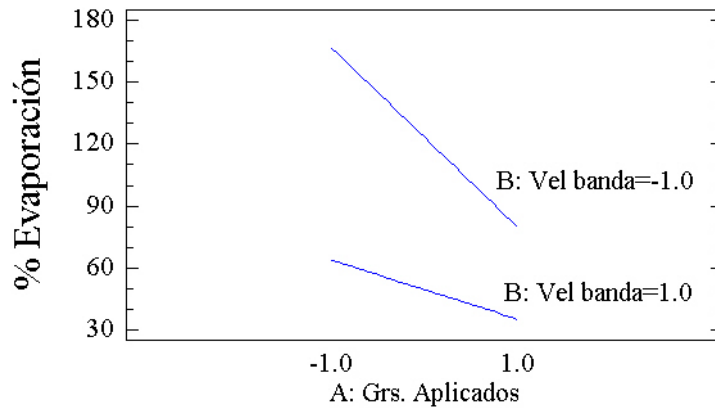
R-Cuadrada= 92.8139 %

R-Cuadrada (ajustada para g.l.)= 88.0232 %

Error estándar de Est. = 19.0379

Promedio absoluto del error = 12.1061



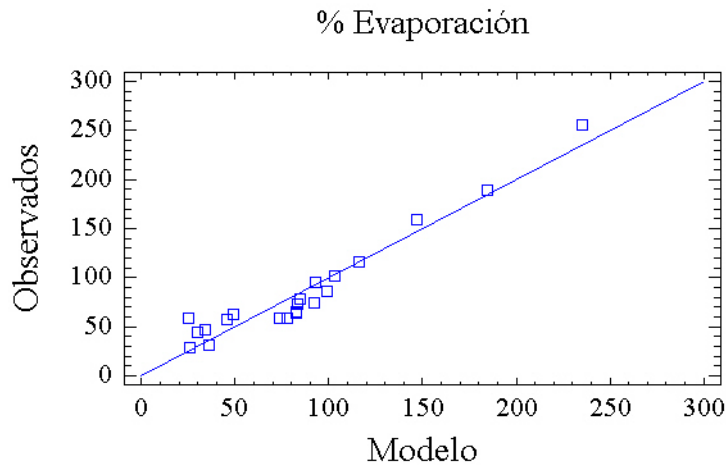


**Figura 4.4.-**Gráfica de interacción AB para la Tabla 4.4.

A partir del arreglo experimental en la Tabla 4.3, y usando el método de mínimos cuadrados, se derivó un modelo que permite predecir el porcentaje de evaporación (Ecuación 4.1):

$$\% \text{ evaporación} = 86.397 - 28.6976A - 36.755B - 14.6144C + 23.2312D + 14.488AB - 9.76644AD + 9.07311BC - 9.05896BD \quad (4.1)$$

Con esta regla de correspondencia, se puede obtener un secado óptimo en rapidez y eficiencia dentro de un gramaje desde 3.32 a 8.18 gramos y en consecuencia, funciona con cualquier tipo de aplicación: rodillos, cortina ó pistolas. Para validar la Ecuación 4.1 se elaboró una gráfica con los valores predichos del modelo versus los observados durante la experimentación la cual se ilustra en la Figura 4.5; allí, se aprecia que los puntos caen dentro de la recta a 45°, concluyendo que predice satisfactoriamente la variable porcentaje de evaporación.



**Figura 4.5.-**Validación de la Ecuación 1.

### **Diseño experimental para comparar secadores por convección e infrarrojo**

Para equiparar los resultados con las condiciones industriales, se visitó una tenería llevándose a cabo mediciones en un horno tradicional por convección de 12 m de largo; se aplicó un gramaje promedio de 6.2 grs y desviación estándar de 0.17 sobre 12 ensayos. La evaporación media se ubicó en 68 % con una desviación estándar de 6 y una temperatura de salida alrededor de 55° C para una velocidad de 18 m/min, se usó una formulación de acabado con los mismos sólidos que los utilizados en el secador infrarrojo (28 %). Lo anterior significa que en la tenería visitada, los parámetros de operación del secador por convección no permiten evaporar el 100 % del agua aplicada.

Para evaluar objetivamente ambas tecnologías (infrarrojo vs convección), se realizaron experimentos adicionales empleando el secador infrarrojo para evaporar únicamente el 70 % del agua aplicada en la formulación sin elevar la temperatura más de 80° C dentro del túnel; del conocimiento adquirido en previos arreglos experimentales se emplearon justamente 3 paneles infrarrojos. Los factores manipulados fueron: gramaje de la película (A), velocidad de transporte (B), y distancia de panel—sustrato para los dos últimos quemadores (C2, C3). La

distancia entre el primer quemador y las muestras de cuero se mantuvo en 20 cm mientras que se alternaba la elevación de los otros dos quemadores. En la Tabla 4.5 se aprecia la matriz experimental con los resultados en su correspondiente anova en la Tabla 4.6.

<b>Tabla 4.5.-Arreglo experimental para contrastar los secadores.</b>						
<b>Corrida</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>% Evaporación (experimental)</b>	<b>% Evaporación (modelo)</b>
1	-1	-1	-1	-1	93.78	88.26
2	-1	1	-1	-1	48.24	41.33
3	-1	-1	1	-1	92.44	88.85
4	-1	1	1	-1	43.24	41.90
5	-1	-1	-1	1	92.28	91.50
6	-1	1	-1	1	42.95	41.24
7	-1	-1	1	1	88.75	88.91
8	-1	1	1	1	40.02	40.99
9	1	-1	-1	-1	62.22	59.01
10	1	1	-1	-1	30.75	29.35
11	1	-1	1	-1	57.29	59.77
12	1	1	1	-1	33.35	31.10
13	1	-1	-1	1	62.75	59.59
14	1	1	-1	1	31.36	30.93
15	1	-1	1	1	57.35	57.59
16	1	1	1	1	30.28	29.98
17	0	0	0	0	53.32	57.86
18	0	0	0	0	58.52	59.50
19	0	0	0	0	50.30	59.90
20	0	0	0	0	52.98	59.66
21	0	0	0	0	53.66	58.62

A = Gramaje de película (3.9075, 5.608, 9.19125 gr)  
 B = Velocidad de transporte (5.76, 9.6, 13.44 m/min)  
 C2 = Distancia del panel 2 a el sustrato (14, 20, 26 cm)  
 C3 = Distancia del panel 3 a el sustrato (14, 20, 26 cm)

**Tabla 4.6.-Anova para el porcentaje de evaporación de la Tabla 4.5.**

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>G.L.</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>Valor-p</b>
<b>A: Gramaje Aplicado</b>	1800.15	1	1800.15	97.44	0.0000
<b>B: Velocidad de transporte</b>	6064.29	1	6064.29	328.25	0.0000
<b>AB</b>	388.257	1	388.257	21.02	0.0003
<b>Error Total</b>	314.066	17	18.4745		
<b>Total (corr.)</b>	8360.29	20			

R-Cuadrada = 96.2434 %

R-Cuadrada (ajustada para g.l.) = 95.5804 %

Error estándar de Est. = 4.29819

Promedio absoluto del error = 2.91433

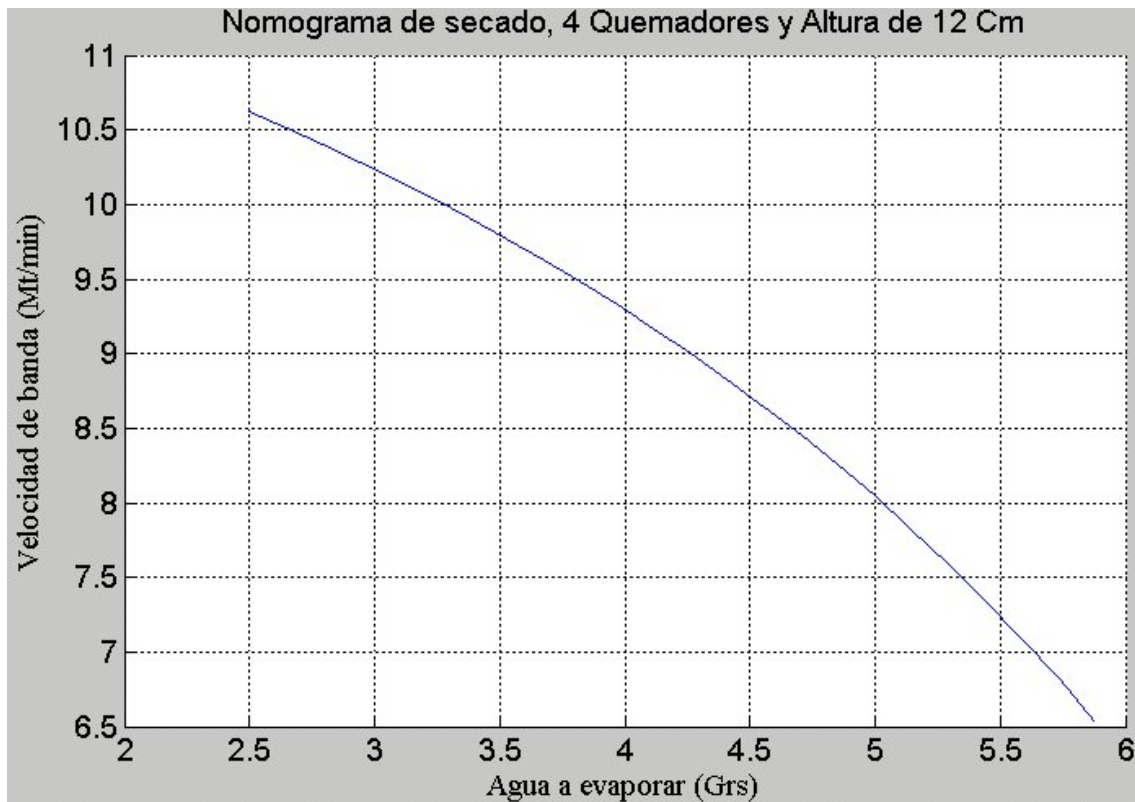
En ésta, los dos factores que se eligieron junto con una interacción entre la velocidad de transporte y el gramaje de película se hallaron estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 99 %. La Ecuación 4.2 es un nuevo modelo, valido dentro de la región de experimentación, el cuál podría usarse para predecir el porcentaje de secado para la película de acabado cuando se utiliza la tecnología de energía infrarroja obteniendo un producto comparable con un secador por convección:

$$\% \text{ evaporación} = 55.1652 - 10.3839A - 19.4767B + 4.90718AB \quad (4.2)$$

### **4.3 Uso de los nomogramas**

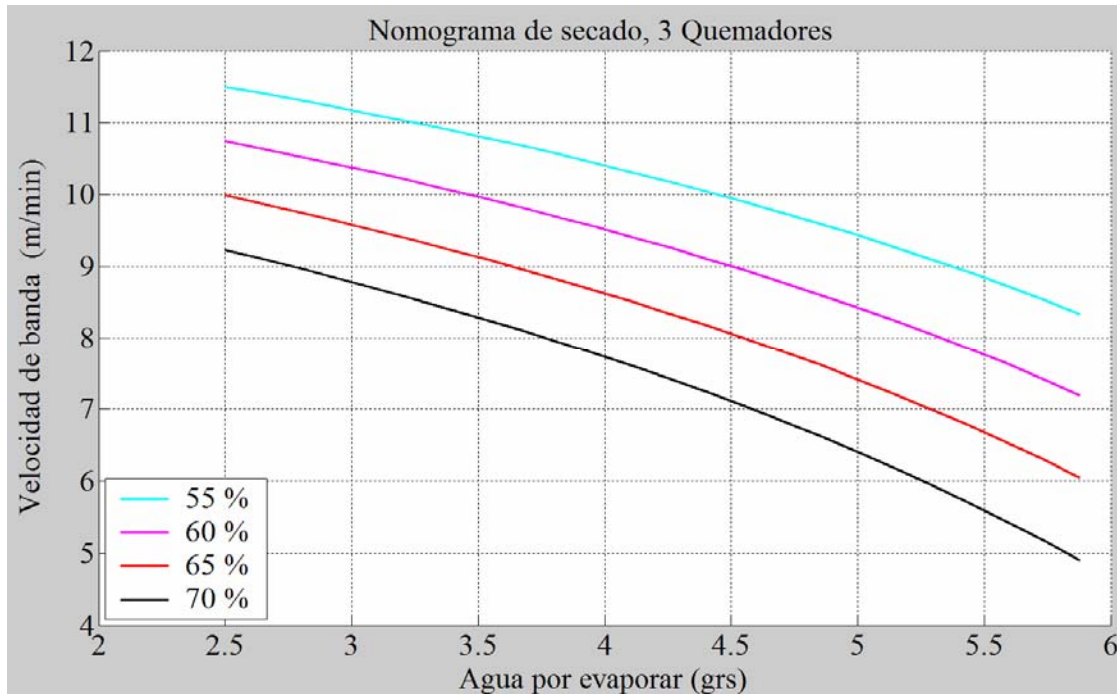
Un nomograma es una representación gráfica de una ecuación que permite leer la solución de cálculos sin necesidad de efectuarlos y normalmente la interpretación es muy sencilla. La Ecuación 4.1 se puede utilizar para construir nomogramas como el ilustrado en la Figura 4.6; éste se calculó para un 100 % de evaporación. Una vez definido los gramos de agua por evaporar, se busca ese valor en la abscisa, la intersección con la curva determina de una manera fácil y rápida la

velocidad de transporte (ordenada) requerida para secar la película de acabado del cuero en su totalidad. Por ejemplo, si se pretende evaporar 4 gramos de agua de una formulación aplicada al cuero, solamente se localiza el valor de 4 en la abscisa y sobre la intersección de la ordenada se lee aproximadamente 9.2 m/min; basta con modificar ese parámetro en el panel de control del horno por infrarrojo y se obtendrá el producto con las características de secado requeridas.



**Figura 4.6.-**Nomograma para secado óptimo en la película de acabado del cuero.

Otro nomograma es el de la Figura 4.7 donde se presentan 4 curvas, cada una de ellas para un porcentaje específico de evaporación: Se ocuparon solo tres paneles de infrarrojo ya que el objetivo es equipararlo con las condiciones industriales del horno por convección. Notar que para lograr un porcentaje de evaporación por encima de 60 % basta con disminuir la velocidad de la banda en base a los gramos aplicados de agua por volatilizar.



**Figura 4.7.-**Nomograma para varios porcentajes de evaporación.

#### **4.4 Perfil de temperatura del prototipo**

La Tabla 4.7 ilustra un arreglo con mediciones de temperatura después de cada panel (no perder de vista que se trata del diseño para comparar el secado por convección e infrarrojo); a partir de ésta se dedujeron las Ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5. Visualizando las curvas de la Figura 4.8, se confirmó la sospecha que la temperatura después del panel infrarrojo número 3 estuvo por arriba de 90° C para una evaporación de 70 %. Esto significa que en las corridas del arreglo experimental mostrado en la Tabla 4.3 donde el secado estuvo por encima del 70 %, la temperatura sobre la superficie de la probeta de cuero dentro del túnel alcanzó al menos 80° C. Cabe mencionar que la ordenada al origen para la temperatura del tercer panel (Ecuación 4.5), el número de 80.3285 indica que una disminución en la velocidad de transporte y/o en el gramaje de la película provocará una elevación de la temperatura por arriba de ese valor. Finalmente,

para verificar la adecuación de estas reglas de correspondencia, se graficaron las respuestas predichas por los modelos contra las observadas experimentalmente (Figura 4.9), una igualdad perfecta sería aquella donde los puntos caen justamente sobre una línea a 45°.

**Tabla 4.7.-Temperatura después de cada panel (° C).**

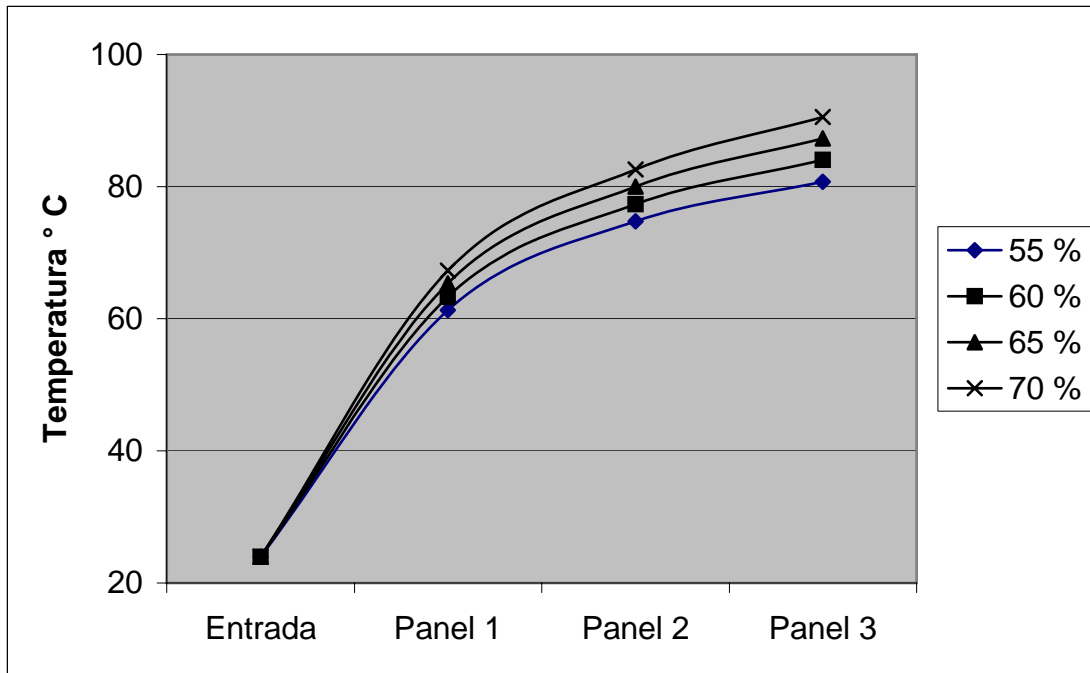
<b>Corrida</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Panel 3</b>
<b>1</b>	-1	-1	-1	-1	78.2	92.4	106.8
<b>2</b>	-1	1	-1	-1	53.2	72.4	77.8
<b>3</b>	-1	-1	1	-1	74.2	95.4	99.6
<b>4</b>	-1	1	1	-1	53.6	66.6	76.8
<b>5</b>	-1	-1	-1	1	82.8	88.2	96.4
<b>6</b>	-1	1	-1	1	55.4	71.2	79.2
<b>7</b>	-1	-1	1	1	74	93.6	94.4
<b>8</b>	-1	1	1	1	56.8	69.2	74.2
<b>9</b>	1	-1	-1	-1	56.6	76.8	93.6
<b>10</b>	1	1	-1	-1	50.8	54.2	54.4
<b>11</b>	1	-1	1	-1	57	66	86.6
<b>12</b>	1	1	1	-1	52.4	52.8	55.8
<b>13</b>	1	-1	-1	1	57.8	71.6	87.4
<b>14</b>	1	1	-1	1	50.6	54.8	56.2
<b>15</b>	1	-1	1	1	57.6	75.4	69.2
<b>16</b>	1	1	1	1	48.6	52.6	52.8
<b>17</b>	0	0	0	0	62.8	73	82.6
<b>18</b>	0	0	0	0	68.2	83.8	91.2
<b>19</b>	0	0	0	0	63.6	87.4	89.8
<b>20</b>	0	0	0	0	71.8	92.8	94.6
<b>21</b>	0	0	0	0	65.6	85.6	87.2

A = Gramaje de película (3.9075, 5.608, 9.19125 gr)

B = Velocidad de transporte (5.76, 9.6, 13.44 m/min)

C2 = Distancia del panel 2 a el sustrato (14, 20, 26 cm)

C3 = Distancia del panel 3 a el sustrato (14, 20, 26 cm)



**Figura 4.8.-**Perfil de temperatura para varios porcentajes de evaporación.

$$Temp\ panel\ 1 = 61.0126 - 6.47335A - 7.49314B + 4.08136AB \quad (4.3)$$

$$Temp\ panel\ 2 = 74.178 - 9.77214A - 10.6416B + 1.00823AB \quad (4.4)$$

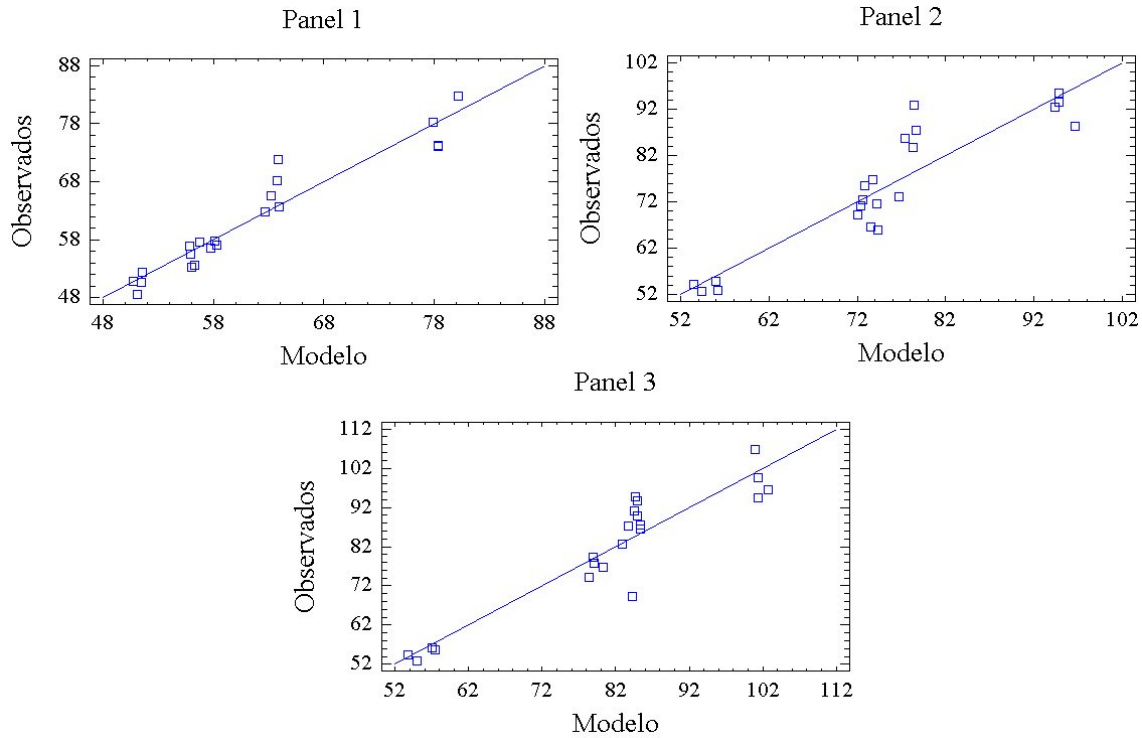
$$Temp\ panel\ 3 = 80.3285 - 9.97776A - 13.2227B - 1.60986AB \quad (4.5)$$

#### **4.5 Segunda versión del secador por infrarrojo**

Hasta aquí se ha expuesto que el uso de radiación infrarroja para el secado de la película de acabado del cuero puede reducir la longitud de los hornos y el tiempo de residencia dentro de estos. Sin embargo, atendiendo a la filosofía de mejora continua, un nuevo diseño del secador fue concebido; la presente idea resultó de observar un calentamiento importante en las paredes del equipo; se debe recordar que la finalidad del equipo es transferir calor a la superficie del cuero, hacia cualquier otra parte representa una dilapidación de energía. Entonces, para



reducir las pérdidas por radiación hacia los alrededores, se instaló un material delgado y altamente reflejante formando un canal con geometría trapezoidal.



**Figura 4.9.-**Validación de las Ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5.

En el análisis teórico de la transferencia de calor por radiación, Cengel (2003), Mahan (2002), y Siegel y Howell (2002) comentan que se necesita la temperatura o la tasa neta de transferencia de calor para cada superficie, pudiendo obtener una única solución de la temperatura de superficie y las velocidades netas de transferencia. Para el sistema analizado en esta tesis, se conoce la velocidad de transferencia de calor desde el panel infrarrojo (7619 watts), consiguiendo determinar la tasa inicial de transferencia de calor por radiación desde el panel infrarrojo hacia la superficie del cuero y las paredes del secador. Se consideraron cuatro superficies y se emplearon las Ecuaciones 4.6 y 4.7 para formar un sistema de 8 igualdades no lineales; al resolverlas se determinan las cuatro radiosidades  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  y  $J_4$ , la temperatura del panel infrarrojo y las tasas netas de transferencia de calor por radiación. Los resultados de los cálculos muestran una transferencia

neto de calor hacia la superficie del sustrato: para el primer diseño del secador fue de  $-5,850$  watts y para la nueva versión cambió a  $-7,238$  watts; es decir, un 23 % de aumento en la eficiencia energética (el sistema de ecuaciones no lineales y su solución se encuentran en el apéndice A). El signo negativo indica que la transferencia neta de calor por radiación es del panel de infrarrojo hacia la probeta de cuero.

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (4.6)$$

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (4.7)$$

Donde:

- $\dot{Q}_i$  = Tasa Neta de Transferencia de Calor por Radiación
- $A_i$  = Area de la Superficie (0.2762, 0.5072, 0.2309, 0.2309 m)
- $N$  = Número Total de Superficies (4)
- $F_{i \rightarrow j}$  = Factor de Visión entre las Superficies i-j
- $J_i$  = Radiosidad
- $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann  $\left( 5.57 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$
- $T_i$  = Temperatura Absoluta
- $\varepsilon_i$  = Emisividad (0.9, 0.68, 0.07, 0.07)

Usar una matriz experimental para comparar las dos versiones es un camino objetivo, ya que este procedimiento no está siendo influenciado por opiniones o emotividad personal, solo se basa en hechos reales. Además, por referencia de especialistas en el ramo (capítulo 2), utilizar diseños experimentales ayuda a obtener conclusiones objetivas acerca del fenómeno estudiado. De este modo, la Tabla 4.8 muestra el arreglo experimental que se empleó para evaluar el nuevo diseño del secador infrarrojo; los datos observados se muestran a la derecha. En

éste solamente dos variables fueron manipuladas: gramaje de la película (A) y velocidad de transporte (B), mientras que se utilizaron tres paneles y la distancia de cada uno hasta las probetas se mantuvo en 20 centímetros. Como se dijo anteriormente, la Ecuación 4.2 puede ser útil para determinar el porcentaje de evaporación y también para comparar la innovación contra otros secadores por convección bajo condiciones de operación industriales.

**Tabla 4.8.-Arreglo experimental usado para comparar la innovación.**

<b>Corrida</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Evaporación %</b>	<b>Temperatura de salida(°C)</b>
1	-1	-1	104.9	93.6
2	-1	1	59.17	72.8
3	-1	-1	104.9	92.8
4	-1	1	51.95	66.6
5	-1	-1	107.77	91.2
6	-1	-1	104.37	101.6
7	-1	1	42.99	71
8	-1	1	49.65	68.2
9	1	1	41.25	57.4
10	1	1	32.35	53.2
11	1	-1	76.01	86.2
12	1	1	39.07	56.4
13	1	-1	81.11	89.6
14	1	-1	59.02	86.8
15	1	1	31.17	57.8
16	1	-1	74.12	83.4

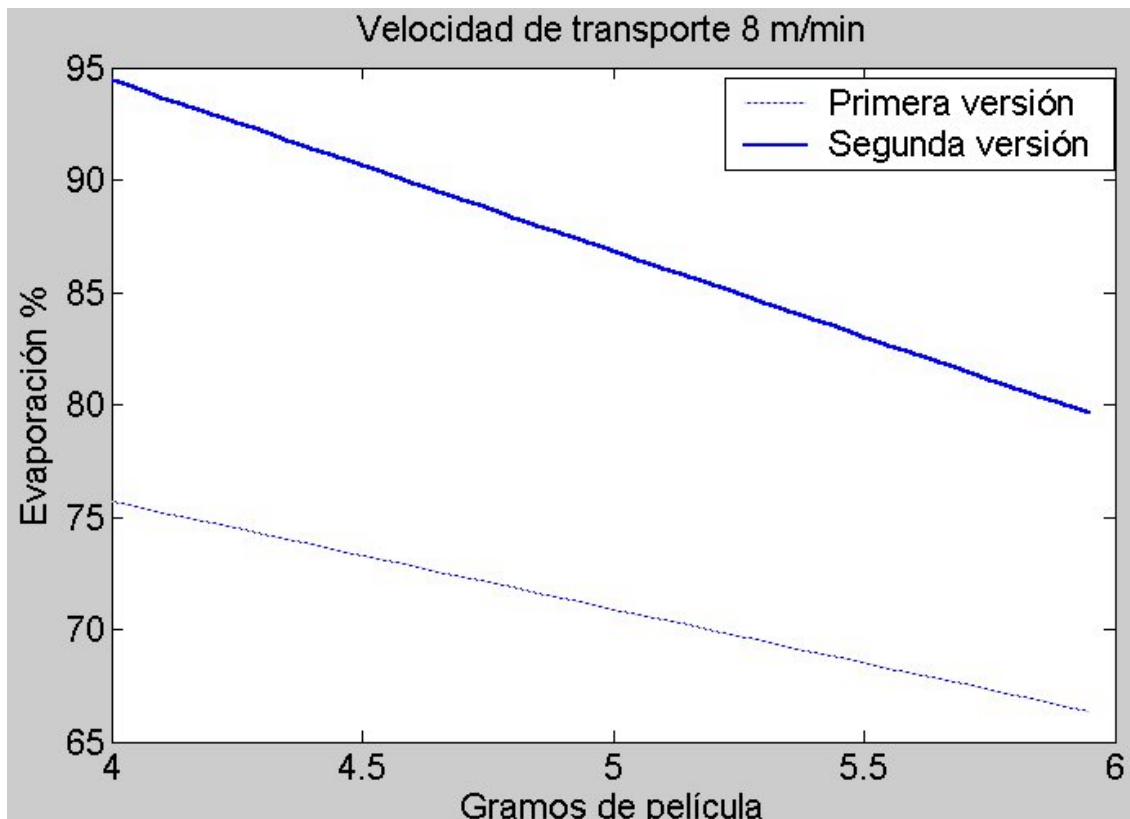
A = Gramaje de la película (3.99, 6.30 gr)

B = Velocidad de transporte (7.68, 15.36 m/min)

En la región experimental usada para derivar la Ecuación 4.2 se encontraron valores alrededor del 93 % o más bajos para la respuesta porcentaje de evaporación; sin embargo, algunas cantidades de la Tabla 4.8 son mayores a 100 %. Visiblemente, esto ocurrió por emplear escudos de radiación, ya que se consiguió destinar mayor energía hacia las probetas. No obstante, en la tenería es conveniente impedir que el horno evapore más del 100 %, pues esto indica que se

remueve humedad propia del cuero, lo cual es un evento indeseable. La Ecuación 4.8 se desarrolló a partir de los resultados en la Tabla 4.8; el modelo se requirió para equiparar la eficiencia a través de un nomograma (Figura 4.10) producto de las Ecuaciones 4.2 y 4.8.

$$\% \text{ Evaporación} = 65.1081 - 11.2112A - 21.3319B + 3.84335AB \quad (4.8)$$



**Figura 4.10.-**Nomograma para validar la eficiencia del nuevo diseño.

La Figura 4.10 sirve para estudiar el porcentaje de evaporación como función del gramaje de la película, la velocidad de transporte fue mantenida en 8 m/min; también, se puede observar un incremento de aproximadamente 20-25 % en el aprovechamiento del calor dentro del sistema de secado por infrarrojo respecto a la primera versión. La falta de paralelismo en las líneas es debido al error experimental; sin embargo, éste es mínimo tal como se aprecia en la Tabla 4.9. De

este modo se demostró prácticamente que los escudos de radiación mejoraron la eficiencia energética.

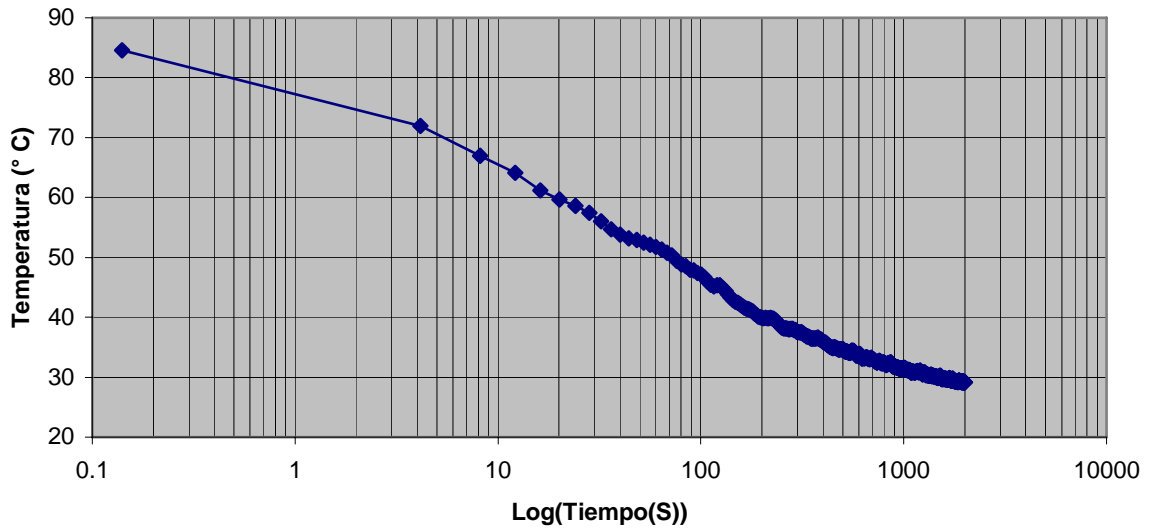
**Tabla 4.9.-Anova para el % de evaporación de la Tabla 4.8.**

<b>Fuente De Variación</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>G. L.</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>Valor-p</b>
<b>A:Gramaje de la película</b>	2662.21	1	2662.21	229.49	0.0000
<b>B:Velocidad de transporte</b>	7194.82	1	7194.82	620.22	0.0000
<b>AB</b>	312.865	1	312.865	26.97	0.0002
<b>Error total</b>	139.206	12	11.6005		
<b>Total (corr.)</b>	11409.7	15			

R-cuadrada = 98.7799 %  
R-cuadrada (ajustada para g.l.) = 98.4749 %  
Error estándar de los est. = 3.40595  
Error medio absoluto = 2.38878

Para verificar la calidad de la Ecuación 4.8, en la Tabla 4.9 se muestra el respectivo análisis de varianza donde aparece el valor-p para cada uno de los factores estudiados y su interacción, siendo menor a 0.01, indicando que su efecto es estadísticamente diferente de cero con un nivel de confianza del 99 %, consecuentemente ambos componentes tienen una significancia trascendental. El 98.77 % de la variabilidad en la respuesta porcentaje de evaporación es explicada por la Ecuación 4.8, tal como se aprecia en la respectiva anova (R-cuadrada).

Para terminar esta sección, en la Figura 4.11 se muestra el enfriamiento de la superficie del cuero a la salida del túnel para secar 4.3 gr / ft<sup>2</sup> de agua. Este enfriamiento fue vertiginoso debido a una interesante propiedad de la radiación infrarroja para las condiciones de operación experimentales, se calentó principalmente la superficie del cuero.



**Figura 4.11.-**Enfriamiento del cuero a la salida del túnel secando 4.3 gr / ft<sup>2</sup> de agua.

Observar que el enfriamiento se comporta exponencialmente, es decir, la temperatura disminuye de 84° C a 50° C en solamente 68 segundos, y alrededor de 35° C en 400 segundos. La ley de enfriamiento de Newton (Ecuación 4.9) enuncia que si la temperatura  $T$  de un cuerpo es más alta que la temperatura de los alrededores  $T_s$  el cuerpo perderá una cantidad de calor  $dQ$  dentro del intervalo entre  $t$  y  $t+dt$ , disminuyendo la temperatura  $T$  en  $dT$ . La solución general de la ley de enfriamiento de Newton es una función con descenso exponencial (Zill, 2006). Para la presente aplicación se logró predecir la temperatura de enfriamiento del cuero usando la Ecuación 4.10, donde la constante  $r$  se aproximó experimentalmente.

$$\frac{dT}{dt} = -r(T-T_s) \tag{4.9}$$

$$T(t) = 31.68e^{-t/187.45} + 30.69 \tag{4.10}$$

#### **4.6 Balance de calor para el prototipo**

Los componentes del balance de calor se representan en la Ecuación 4.11. Para evaporar 6 gr/ft<sup>2</sup> de agua se emitieron 205.7 kJ desde el panel infrarrojo, de este total, el agua absorbió 15.44 kJ, el cuero 7.61 kJ, el aire 10.9 kJ y la lámina 169.9 kJ. Es decir, gran parte del calor generado no se destinó a evaporar el agua de la película de acabado del cuero. Por último, dividiendo la energía absorbida por el agua y el cuero entre la energía emitida por el panel, se alcanzó una eficiencia energética del túnel de secado aproximadamente de 11.2 % (Los cálculos a detalle se muestran en el apéndice B).

$$Q_{panel} = Q_{agua} + Q_{cuero} + Q_{aire} + Q_{lamina} \quad (4.11)$$

Donde:

$Q_{panel}$  = Calor emitido por el panel infrarrojo a gas

$Q_i$  = Calor absorbido por el elemento  $i$

#### **4.7 Comparación del secador por convección e infrarrojo**

Las diferencias trascendentales (longitud, tiempo de residencia y consumo de gas) de un secado por medio de energía infrarroja versus un secado tradicional por convección es mostrado en la Tabla 4.10. Una ventaja consecuencia de este proyecto es que la longitud de horno empleado en la investigación es más corto que un secador tradicional. Un equipo de gran tamaño puede limitar las instalaciones de la tenería, impactando directamente en una menor capacidad de producción; aunado a ello, hay una mejoría en el consumo de gas, éste es un 25 % menor. En consecuencia, se puede comentar que adoptar esta tecnología de secado ayudará a la industria curtidora local y nacional a tener mejores elementos para luchar contra la atroz competencia internacional.

**Tabla 4.10.-Comparación de secadores.**

	<b>Convección</b>	<b>Infrarrojo</b>
<b>Longitud</b>	12 m	4 m
<b>Tiempo para secar 6 gr/ft<sup>2</sup></b>	33 s	27 s
<b>Consumo de gas</b>	8 Kg/h	6 Kg/h



## **Capítulo 5**

### ***Conclusiones y Recomendaciones***

#### ***5.1 Conclusiones***

En la investigación expuesta se evaluó, y rediseñó un prototipo para el secado por infrarrojo a gas para el acabado del cuero. La hipótesis planteada no se rechazó, es decir, un horno por infrarrojo ahorró un 20 % de gas LP y se redujo el largo a menos de la mitad respecto a los hornos tradicionales por convección, de igual manera, las propiedades físicas de la película de acabado para las probetas de cuero empleadas no se demeritaron.

Los nomogramas construidos a partir de modelos experimentales estimaron adecuadamente la eficiencia de evaporación para los secadores. Estos nomogramas serán de gran utilidad para el operador en planta, evitando que la sintonización de las máquinas se lleve a cabo a prueba y error.

Empleando escudos de radiación que tienen una baja emisividad, la innovación mejoró hasta en un 25 %, es decir, ésta aumentó su eficiencia para transferir el calor hacia el sustrato. Lo anterior se validó aplicando un modelo teórico, midiendo la temperatura sobre las paredes del horno y usando un modelo de superficie de respuesta para el porcentaje de evaporación.

#### ***5.2 Recomendaciones futuras***

Apoyándose en la experiencia obtenida al llevar a cabo esta tesis se recomienda lo siguiente:

- El método de radiación neta para recintos cerrados se usó para modelar la velocidad inicial de la transferencia de calor por radiación; sin embargo, éste se sujeta a los coeficientes de los factores de visión entre las superficies. Otra alternativa de modelación es el método de Montecarlo, el cual es una técnica que proporciona soluciones a las expresiones

matemáticas usando aproximación probabilística. Éste ha sido probado en diversos problemas donde obtener la solución determinística es complicado, esos resultados han sido satisfactorios.

- Se exhorta a analizar en detalle la viabilidad de combinar el secado infrarrojo con algún otro método, seguramente se puede perfeccionar la innovación presentada. Una posibilidad podrían ser las cuchillas de viento, éstas son esencialmente hojas de aire a baja presión pero cuya velocidad es alta; además que primordialmente removerían la humedad de la superficie.
- Respecto a la instrumentación del prototipo, se sugiere instalar 3 termómetros infrarrojos dentro del túnel, con ello se podrá monitorear la temperatura del sustrato de una manera dinámica.

### ***5.3 Comentarios finales***

Los tiempos modernos exigen que los centros nacionales de investigación, como el CIATEC, apoyen a los industriales mexicanos para mejorar sus procesos claves, por ello, se deben unir esfuerzos que superen la brecha entre realizar las tareas artesanalmente y usar una metodología científica. Tomando en cuenta lo anterior, se realizó esta investigación de un nuevo sistema de secado para el acabado del cuero, la cual se llevó a cabo gracias al financiamiento que autorizó el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y la colaboración de la empresa Together For Leather (TFL) quien cooperó con materiales en especie.