

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR
EN TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO FR-4
DURANTE EL PROCESO DE REFLUJO

POR

ARMANDO ESAÚ LEAL DÍAZ

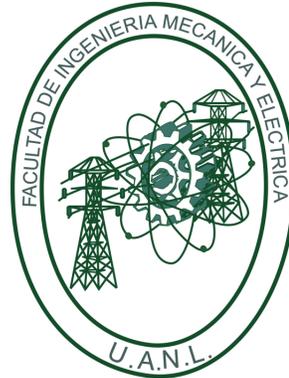
COMO OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

JULIO DE 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR
EN TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO FR-4
DURANTE EL PROCESO DE REFLUJO

POR

ARMANDO ESAÚ LEAL DÍAZ

COMO OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

JULIO DE 2016

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Simulación de la Transferencia de Calor en Tarjetas de Circuito Impreso FR-4 Durante el Proceso de Reflujo», realizada por el alumno Armando Esaú Leal Díaz, con número de matrícula 1468130, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



Dr. Moisés Hinojosa Rivera

Asesor



Dr. Roberto Carlos Cabrales Gómez

Revisor



Dra. Yazmín Guadalupe Acosta Sánchez

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Ciudad Universitaria a Julio de 2016

Dedicado a:

Mis padres

Mi prometida Beatriz

Mis abuelos y familiares

Mis amigos.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XIII
Prólogo	xv
Resumen	xvii
1. Introducción	1
2. Transferencia de calor y simulación	3
2.1. Transferencia de calor	3
2.1.1. Conducción	4
2.1.2. Convección	6
2.1.3. Radiación	9
2.2. Simulación	14
2.2.1. Sistema	14
2.2.2. Modelo	15
2.2.3. Método de elementos finitos	17

2.2.4. Método de diferencias finitas	19
2.2.5. Método iterativo	19
3. Tarjetas de circuito impreso (PCBs)	22
3.1. Materiales de los PCBs	23
3.2. Manufactura de PCBs	26
3.2.1. Proceso de reflujo	28
3.2.2. Horno de reflujo	29
3.3. Simulación de la transferencia de calor en PCBs	32
4. Motivación, hipótesis y objetivos.	37
4.1. Motivación	37
4.2. Hipótesis	38
4.3. Objetivos generales	39
4.4. Objetivos específicos	39
5. La simulación	40
5.1. Materiales y equipo	41
5.2. Propiedades del PCB	42
5.3. Estudio del perfil de calentamiento del horno de reflujo	43
5.4. Técnicas de simulación	46
5.4.1. Análisis numérico por diferencias finitas	46

5.4.2. Simulación por elementos finitos	50
6. Resultados y discusión	53
6.1. Condiciones del horno de reflujo	53
6.2. Temperatura en la superficie del PCB	55
6.3. Simulación termo-mecánica del PCB	56
7. Conclusiones y trabajo futuro	61
7.1. Conclusiones	61
7.2. Trabajo futuro	62
A. Apéndice A: Resultados de la simulación por MDF	63
B. Apéndice B: Resultados de la simulación por MEF	65
Bibliografía	68

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Gráfico de la industria automotriz en México.	2
2.1. Conducción térmica a través de una pared plana con espesor Δx y área de transferencia de calor A [1].	5
2.2. Transferencia de calor por convección a través de un fluido que se encuentra entre platos paralelos [1].	6
2.3. Transferencia de calor de una superficie caliente al aire mediante con- vección [1].	6
2.4. El flujo de un fluido a través de una superficie se detiene completa- mente debido a la condición de no deslizamiento [1].	8
2.5. Enfriamiento mediante convección forzada y convección natural [1].	9
2.6. Radiación térmica entre dos superficies [2].	9
2.7. Radiación de cuerpo negro. Representa la máxima cantidad de radia- ción que puede emitir un cuerpo [1].	11
2.8. La absorción de radiación que incide sobre una superficie opaca [1].	12
2.9. Transferencia de calor por radiación entre una superficie y sus alrede- dores [1].	13

2.10. Procedimiento de modelación por método de elementos finitos [3].	16
2.11. Discretización de un modelo de ingeniería.	18
3.1. a) Tarjeta de circuito impreso (PCB) utilizado en la industria automotriz, b) tablero de automóvil.	22
3.2. Sistemas multifuncionales de monómeros epoxi [4].	23
3.3. Estilos de fibra de vidrio usados en PCBs [4].	23
3.4. Trazos de cobre que revisten al material preimpregnado.	24
3.5. Materiales que componen los PCBs.	24
3.6. Diagrama de proceso de PCB.	25
3.7. Diagrama de fases de la soldadura SAC [5].	26
3.8. Diagrama de fases de la soldadura Sn-Pb.	26
3.9. Diagrama del proceso de reflujo.	27
3.10. Tipos de distorsión en los PCBs; a) arqueamiento y b) torcedura [6].	28
3.11. Ejemplo de perfil de temperatura en un proceso de reflujo [7].	28
3.12. Horno de reflujo Furukawa XNK-745.	29
3.13. Vista de la sección transversal de un horno de reflujo [7].	30
3.14. Módulo de calentamiento por convección forzada [7].	31
3.15. Módulo de enfriamiento por convección forzada [7].	32
3.16. Configuración de boquillas del horno de reflujo [8].	34
3.17. Vista en 3D de la simulación del coeficiente de transferencia de calor por convección a través de las zonas del horno [9].	35

3.18. Representación gráfica de como afecta la distorsión del PCB a un componente [10].	35
3.19. Simulación de los trazos de cobre de un PCB [11].	36
5.1. Diagrama del proceso experimental.	40
5.2. Horno de reflujo de pruebas.	44
5.3. PCB con termopares.	44
5.4. Esquema de las secciones del PCB.	45
5.5. Representación del la superficie del PCB en una hoja de excel.	46
5.6. Ecuaciones explícitas para el análisis numérico por diferencias finitas de la temperatura de la superficie del PCB [2] [12].	47
5.7. Tabla de datos del modelo.	49
5.8. Explicación de los datos se que toman para un nodo en esquina exte- rior con contorno convectivo.	50
5.9. Modificaciones de las opciones de excel para realizar cálculos iterativos.	50
5.10. Modelo importado del PCB.	51
5.11. Proceso para simulación.	51
5.12. Proceso mallado para la simulación.	52
6.1. TP 1 temperatura vs tiempo.	54
6.2. TP 2 temperatura vs tiempo	54
6.3. TP 3 temperatura vs tiempo	54
6.4. TP 4 temperatura vs tiempo	54

6.5. TP 5 temperatura vs tiempo	54
6.6. Análisis de calentamiento a través del tiempo con Δt de a)0 seg. b)60 seg. c)120 seg. d)180 seg. e)240 seg. f)270 seg.	55
6.7. Cargas de convección en el modelo del PCB.	56
6.8. Resultado de la simulación térmica.	57
6.9. Restricción de empotramiento en nodos.	58
6.10. Gráfico del PCB en diferentes ángulos.	59
6.11. Comparación de resultados de simulación con resultados experimen- tales obtenidos por Carlos Rodríguez [13].	60
A.1. Análisis de calentamiento a través del tiempo con Δt de a)0 seg. b)15 seg. c)30 seg. d)45 seg. e)60 seg. f)75 seg.	63
A.2. (Continuación) Análisis de calentamiento a través del tiempo con Δt de g)90 seg. h)105 seg. i)120 seg. j)135 seg. k)150 seg. l)165 seg. m)180 seg. n)195 seg. o)210 seg. p)225 seg. q)240 seg. r)255 seg. s)270 seg.	64
B.1. Resultados de la simulación termo-mecánica con una carga térmica de $5W/m^2 \cdot K$	65
B.2. (Continuación) Resultados de la simulación termo-mecánica con una carga térmica de $5W/m^2 \cdot K$	66
B.3. Resultados de la simulación termo-mecánica con una carga térmica de $7W/m^2 \cdot K$	67

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Materiales típicos de una tarjeta FR-4 [4].	25
5.1. Lista de Materiales.	41
5.2. Tabla de propiedades del PCB proporcionada por el proveedor.	42
5.3. Tabla de propiedades para la simulación.	43
6.1. Coeficientes de convección térmica.	56
6.2. Comparación de las temperaturas obtenidas durante el proceso.	57
6.3. Deformación del PCB a través del tiempo.	58

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que nos brinda a los estudiantes durante los proyectos de investigación, así como a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por la beca que nos brinda para poder realizar nuestro posgrado.

Al Dr. Moisés Hinojosa, por permitirme ser su alumno y la confianza que me otorgó al ofrecerme este proyecto, así como su total apoyo y asesoría. Al Dr. Roberto Cabriales, por el conocimiento y co-asesoría en el proyecto. A mi compañero Carlos Rodríguez por la ayuda y convivencia durante la investigación.

A mis profesores de la maestría, Dr. Ignacio Álvares, Dr. Azael Martínez, Dr. Virgilio González, Dr. Carlos Guerrero, Dr. David Avellaneda, Dra. Selene Sepúlveda, Dra. Lauren Gómez, Dr. Rafael Colás, Dr. Luis Leduc, Dra. Sofía Vázquez y Dra. Ana María Arato, por sus enseñanzas. Al Dr. Martín Edgar Reyes Melo, de quien aprendí mucho en la licenciatura e introdujo en el área de investigación.

A mis compañeros de generación , por el tiempo compartido y convivencia durante la maestría, así como su disposición de prestar ayuda en cualquier momento.

A la empresa Yazaki México y a Luis Montes de Oca, Karla Peña y Victor Salinas, por compartir con nosotros su visión y motivación del proyecto. A mis compañeros en Yazaki, por el compañerismo, disposición y apoyo que me otorgaron.

A mis padres Armando y Judith, quienes han dado todo por mí, por su apoyo en todos los objetivos y proyectos que me he trazado. A mi futura esposa Beatriz, quien me ha motivado a superarme y sobresalir ante cualquier reto que se me presente. A mis familiares y amigos, quienes son parte esencial de mi vida.

Muchas gracias.

PRÓLOGO

La industria local ha pasado por muchas etapas de desarrollo desde fines del siglo XIX, época de la que datan la industria siderúrgica y metalmeccánica, así como la industria cervecera, entre otras. Para ello, el área de Monterrey tuvo que desarrollar capacidades en los campos de la minería, metalurgia y muchos otros. El posterior desarrollo, en la primera mitad del siglo pasado trajo industrias relacionadas con los materiales cerámicos, como la industria del cemento, los ladrillos y del vidrio, así como de losetas y azulejos y otros productos manufacturados a partir de arcillas. Por supuesto, la industria del acero y metalmeccánica se consolidaron. Ello trajo aparejada la necesidad de contar con ingenieros, lo cual coadyuvó a la creación de centros de estudio como la UANL y el ITESM, incluyendo escuelas técnicas y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. La industria de los plásticos vino después, a mediados del siglo XX, primero orientada al ramo textil y posteriormente a envases y productos inyectados o extruidos. Más recientemente Monterrey desarrolló grandes capacidades en la tecnología del aluminio, principalmente para el sector automotriz. Puede entonces decirse que el crecimiento de la industria local ha ido acompañado por el desarrollo de capacidades en la ingeniería de los materiales metálicos, cerámicos y plásticos.

El desarrollo de la industria automotriz, principalmente orientado a la fabricación de autopartes, se vio favorecido por el TLCAN y trajo un gran desarrollo en los sistemas de calidad y de manufactura. Puede decirse que estas capacidades sentaron las bases para el desarrollo de la industria de manufactura aeronáutica. Estas dos industrias han hecho evidente la necesidad de extender el desarrollo de la

ingeniería de los materiales para abarcar los materiales compuestos, particularmente los de matriz polimérica y reforzados con fibras.

Los aviones modernos han sustituido al aluminio en el fuselaje, aplicando ahora compuestos reforzados con fibras, principalmente de carbono y esta tendencia poco a poco ha ido permeando a la industria automotriz, primero en el segmento de autos deportivos, pero puede esperarse que dicha tendencia se acentúe en los próximos diez años. Por otro lado, una aplicación menos visible de los compósitos en la industria automotriz, se da en el material base de las tarjetas de los circuitos impresos del tablero de control, que es un laminado que lleva cobre, resina y fibras. Como nos los explica Esaú en este trabajo, la manufactura de estas tarjetas presenta retos que tienen que ver con el insuficiente conocimiento del comportamiento de estos materiales. En el fondo, situaciones como las descritas ponen de manifiesto la necesidad de impulsar la formación de especialistas en estos materiales, a los más altos niveles, a través de la cooperación del sector industrial con el académico y con el apoyo gubernamental financiando los programas de posgrado de excelencia bajo el esquema de la hélice triple.

En ese escenario se enmarca el trabajo de Armando Esaú Leal Díaz, en el que... no, mejor lo invito a enterarse de los pormenores en las palabras del propio tesista.

M. Hinojosa Rivera

Monterrey, Nuevo León, Julio de 2016

RESUMEN

ANTECEDENTES: Durante el proceso de reflujo, las tarjetas de circuito impreso (PCB) experimentan deformaciones debido a la exposición térmica y la diferencia en las propiedades térmicas de los materiales que lo componen. Hoy en día, trabajos científicos son dedicados a entender el desempeño termo-mecánico de los PCBs mediante la caracterización térmica de los materiales y simulación por análisis por elementos finitos (FEA), los cuáles, pueden ser de gran utilidad en la predicción de defectos ocasionados por las deformaciones.

MÉTODOS: Para obtener una simulación del desempeño termo-mecánico de un PCB, primeramente se hace una medición de las condiciones del horno añadiendo termopares a una tarjeta. Posteriormente, se hace un cálculo de la temperatura en la superficie de la tarjeta mediante un análisis de diferencias finitas con método Gauss-Seidel con ecuación de iteración. Por último, la simulación termo-mecánica mediante análisis de elemento finito utilizando el software ANSYS Workbench.

RESULTADOS: Los datos obtenidos del perfil de temperatura son utilizados para el análisis numérico en la obtención de la temperatura en la superficie del PCB. Debido a que se observa un calentamiento uniforme se realizaron tres simulaciones térmicas con coeficientes de transferencia de calor por convección de 5,6 y 7 $W/m^2 \cdot K$, los resultados térmicos fueron importados al módulo mecánico en el cual se simuló la deformación del PCB.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

A nivel global, la importancia de la industria automotriz en la economía y su papel como propulsor para el desarrollo de otros sectores de alto valor agregado, han provocado que diversos países tengan como uno de sus principales objetivos el desarrollo y fortalecimiento de esta industria. En México no es la excepción, pues la industria automotriz ha propiciado el desarrollo de nuestro país, ya que representa cerca del 3.6% del producto interno bruto mexicano y genera cerca de 530 mil empleos directos e indirectos. Su participación en las exportaciones la coloca como la industria más importante, superando al sector petrolero. Para finales de 2015, las armadoras automotrices tuvieron un incremento del 5.6% de la producción anual con respecto a 2014, que se refleja en 3.4 millones de unidades.

En el mismo año, más del 70% de los vehículos producidos en México fueron exportados, lo que posiciona a nuestro país entre los productores más importantes a nivel mundial, equiparándose con China, India, República de Corea y Brasil, ocupando el octavo lugar en manufactura y el seis entre los principales países exportadores de vehículos automotores. La industria exportó 2.76 millones de automóviles en el año, un alza del 4.4% en comparación al 2014.

Ésta industria se ha pronunciado como precursora de la competitividad en las regiones donde se ha establecido mejorando los empleos, así como mejor desarro-

llo del capital humano. En la figura 1.1 se muestra la distribución de industrias manufactureras automotrices en México.



Figura 1.1: Gráfico de la industria automotriz en México.

En Nuevo León, la industria automotriz esta compuesta por 270 empresas dedicadas a prestar diferentes servicios de autopartes a las compañías de manufactura de automoviles y representan el 10 % del mercado nacional. En el año 2014, la empresa KIA Motors introdujo el sector automotriz al estado, haciendo una inversión de 3.3 millones de dólares.

En éste trabajo de tesis se presenta una de las problemáticas en la industria dedicada a la fabricación de arneses y paneles de instrumentación de los automóviles. Para ésto, se realiza una simulación utilizando el método de elementos finitos del proceso de reflujo en tarjetas de circuito impreso utilizadas en la industria automotriz, ya que durante el proceso de unión de componentes, éstas sufren severas deformaciones que repercuten en la vida útil de la tarjeta, generando grandes pérdidas de producción, lo que se refleja en pérdidas considerables de capital.

CAPÍTULO 2

TRANSFERENCIA DE CALOR Y SIMULACIÓN

En este capítulo se discuten los conceptos teóricos relacionados con las formas de transferencia de calor, así como los modelos de simulación que se relacionan a éste trabajo de investigación y proporcionan el conocimiento básico para su desarrollo.

2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que sucede entre los cuerpos, como resultado de una diferencia de temperatura y que la energía térmica puede ser transferida de un cuerpo a otro a cierta rapidez, bajo condiciones específicas. La termodinámica explica que esta transferencia de energía se le denomina «*calor*».

La transferencia de calor complementa la primera y segunda ley de la termodinámica y proporciona leyes experimentales adicionales que se utilizan para establecer la rapidez de la transferencia de energía. Como ciencia base de la termodinámica, las leyes experimentales usadas como base para la transferencia de calor son simples y fácilmente extensibles, de modo que abarcan gran variedad de situaciones [2].

El requisito básico y fuerza impulsora para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura, ya que no puede existir una transferencia de calor neta entre dos cuerpos que se encuentren a una misma temperatura. La tasa de transferencia de calor en una dirección determinada depende de la magnitud del gradiente de temperatura (la diferencia de temperatura por unidad de longitud) en esa dirección. Cuanto mayor es el gradiente de temperatura, mayor es la tasa de transferencia de calor y siempre sucede desde el cuerpo con la temperatura más alta, al cuerpo con la temperatura más baja y la transferencia de calor se detiene cuando ambos cuerpos alcanzan la misma temperatura [1]. Existen tres formas de transferencia de calor: conducción, convección y radiación [1] [2] [12], que se describen a continuación.

2.1.1 CONDUCCIÓN

La conducción es la forma de transferencia de calor que se produce por la interacción entre las partículas de mayor carga energética y las de menor carga energética de una sustancia. La conducción se presenta en líquidos, sólidos y gases; en fluidos, la conducción se produce mediante la *colisión* y *difusión* de las moléculas durante el movimiento aleatorio, por otro lado en sólidos, se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en la red y el transporte de energía mediante electrones libres.

La tasa de conducción térmica a través de un medio depende de la geometría, su espesor y del material que lo conforma, así como de la diferencia de temperatura (figura 2.1), y es proporcional a la diferencia de temperatura a través de la capa y el área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional a la capa de la superficie (ecuación 2.1) [1].

$$\dot{Q}_{Cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (2.1)$$

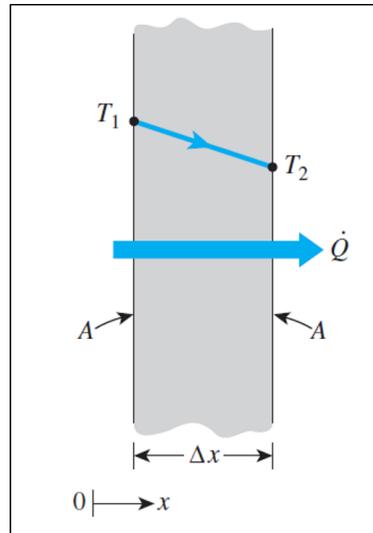


Figura 2.1: Conducción térmica a través de una pared plana con espesor Δx y área de transferencia de calor A [1].

Dónde:

- \dot{Q}_{Cond} : es la tasa de calor conducida.
- k : es la conductividad térmica del material.
- A : es el área de transferencia de calor.
- ΔT : es el diferencial de temperatura.
- Δx : es el espesor del material.

En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación se reduce a su forma diferencial (ecuación 2.2), conocida como la ley de Fourier de la conducción térmica.

$$\dot{Q}_{Cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2.2)$$

Dónde:

- $\frac{dT}{dx}$: es el gradiente de temperatura.

2.1.2 CONVECCIÓN

La convección es la forma de transferencia de calor que se caracteriza por ser entre un sólido y un fluido (líquido o gas) (figura 2.2) que está en movimiento, implica los efectos combinados de la conducción térmica y el movimiento de los fluidos (figura 2.3).

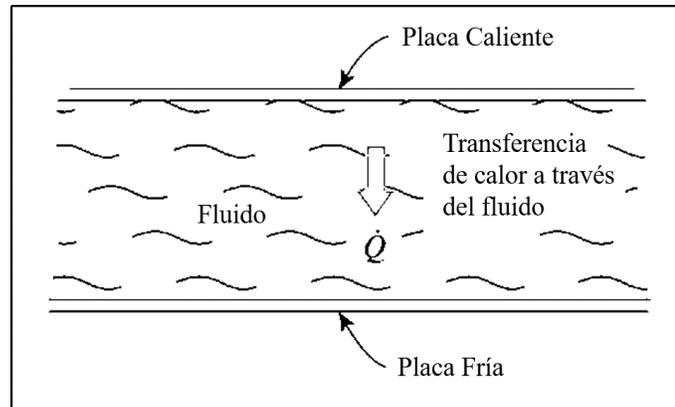


Figura 2.2: Transferencia de calor por convección a través de un fluido que se encuentra entre platos paralelos [1].

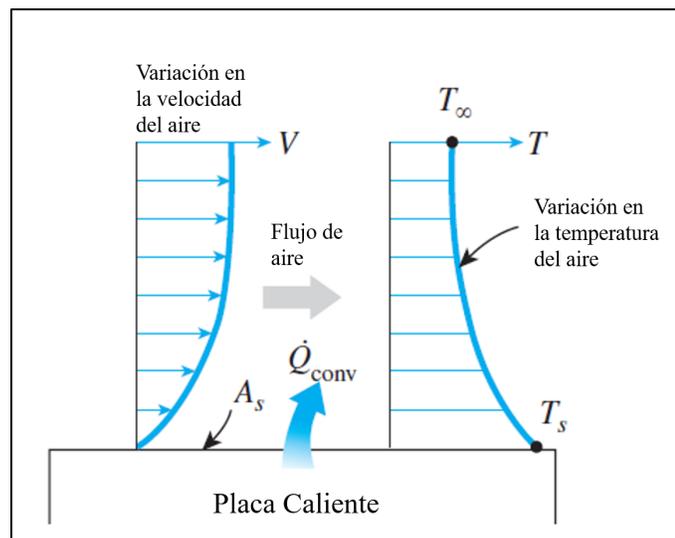


Figura 2.3: Transferencia de calor de una superficie caliente al aire mediante convección [1].

Para expresar el efecto global de la convección, se utiliza la ley de Newton del enfriamiento (ecuación 2.3) [2]:

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

Dónde:

- \dot{Q}_{Conv} : es la tasa de calor convectiva.
- h : es el coeficiente de transferencia de calor por convección.
- A_s : es el área de la superficie de transferencia de calor.
- T_s : es la temperatura de la superficie.
- T_∞ es la temperatura de los alrededores.

El coeficiente de transferencia de calor por convección, « h », se puede definir como la tasa de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área de la superficie por la diferencia de temperatura [1].

Existe una condición de no deslizamiento debido a que el fluido en contacto directo con un sólido se «*adhiera*» a causa de los efectos de viscosidad y carece de deslizamiento [1]. Ésta condición se refiere a que todos los perfiles de velocidad y fuerza deben ser cero con respecto a la superficie entre los puntos de contacto entre el fluido y las superficie del sólido (figura 2.4) e implica que la transferencia de calor desde el sólido a la capa de fluido inmóvil adyacente a la superficie, se lleva a cabo mediante conducción (ecuación 2.4) [1].

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond} = -k_{fluido} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2.4)$$

Dónde:

- T : representa la distribución de temperatura en el fluido.
- $(\partial T / \partial y)_{y=0}$: es el gradiente de temperatura en el sistema.

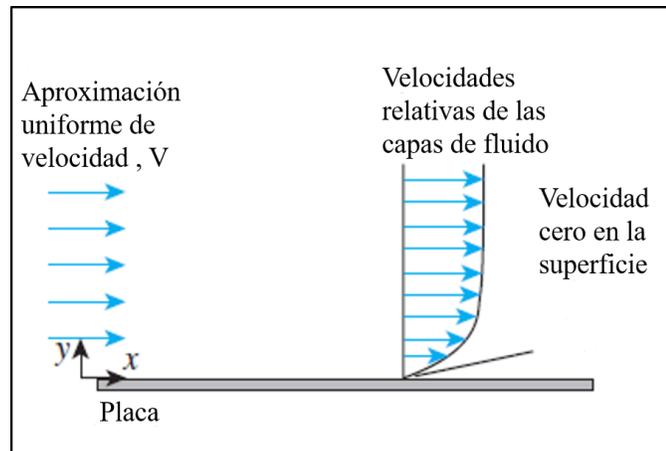


Figura 2.4: El flujo de un fluido a través de una superficie se detiene completamente debido a la condición de no deslizamiento [1].

La transferencia de calor por convección de un sólido a un fluido no es más que la transferencia de calor por conducción de una superficie sólida a la capa de fluido adyacente a la superficie (ecuación 2.5).

$$h = \frac{-k\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)}{(T_s - T_\infty)} \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right) \quad (2.5)$$

En la ecuación 2.5, se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección cuando se conoce la distribución de temperatura dentro del fluido es conocida. A través de la dirección de flujo, el coeficiente de convección se determina calculando apropiadamente el promedio de transferencia de calor a lo largo de la superficie.

La convección se suele clasificar como natural y forzada (figura 2.5), dependiendo de cómo se inicia el movimiento del fluido. La *convección forzada* es cuando el fluido es forzado a fluir sobre una superficie o un tubo por medios externos, como un ventilador. La *convección natural* es cuando cualquier movimiento del fluido se produce por medios naturales, como el efecto de la flotabilidad, que se manifiesta como el incremento del líquido más caliente y la disminución del líquido refrigerante. La convección también se puede clasificar como externa e interna, dependiendo de si el fluido es forzado a fluir en una superficie o a través de una tubería [1].

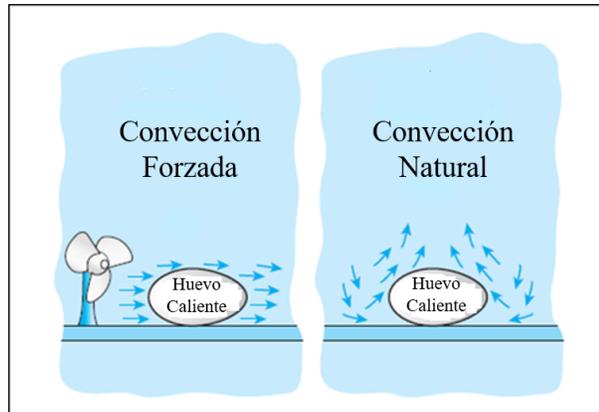


Figura 2.5: Enfriamiento mediante convección forzada y convección natural [1].

2.1.3 RADIACIÓN

La radiación se refiere a la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en la configuración electrónica de los átomos o moléculas. La transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor, es más rápida y no sufre mitigación en el vacío. La transferencia de calor estudia la radiación térmica debido a que es la forma de radiación emitida por los cuerpos a causa de su temperatura (figura 2.6). Es diferente a otros tipos de radiación electromagnética como, rayos X, rayos gamma, micro ondas, etc. Los cuerpos encima del cero absoluto (0 K) emiten radiación térmica.

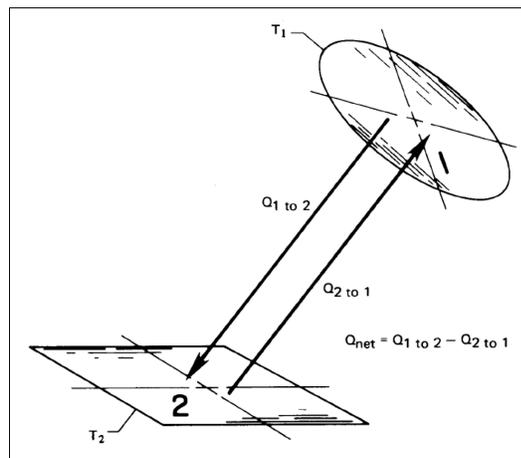


Figura 2.6: Radiación térmica entre dos superficies [2].

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación al variar la temperatura, y usualmente se le considera un fenómeno de superficie para sólidos que son opacos a la radiación térmica, debido a que la radiación emitida por las regiones internas del material no alcanzan la superficie y normalmente la radiación incidente en los cuerpos es absorbida a micrometros dentro de la superficie. La tasa máxima de radiación que es emitida desde la superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) y se da por la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación 2.6).

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_S T_S^4 \quad (W) \quad (2.6)$$

Dónde:

- σ : es la constante de *Stefan-Boltzmann* ($5.627 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ó $0.1714 \times 10^{-8} Btu/h \cdot ft^2 \cdot R^4$).
- A_S : es el área superficial de transferencia de calor.
- T_S : es la temperatura de la superficie.

Una superficie que emite radiación a la tasa máxima es llamado cuerpo negro y a la radiación emitida por éste se le conoce como radiación de cuerpo negro (figura 2.7). La radiación emitida por superficies reales es menor que la radiación de cuerpo negro a la misma temperatura (ecuación 2.7).

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_S T_S^4 \quad (W) \quad (2.7)$$

Dónde:

- ε : es la emisividad de la superficie.

El valor de la *emisividad* está en el rango de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, y es una medida de que tan próxima es una superficie a un cuerpo negro para que $\varepsilon = 1$. La *absortividad* (α) es una propiedad importante de la radiación de una superficie y es la fracción

de radiación que incide y absorbe una superficie; su valor está en el rango de $0 \leq \alpha \leq 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él, por ende, un cuerpo negro emite y absorbe ($\alpha = 1$) radiación perfectamente. La emisividad y la absorptividad dependen de la temperatura y la longitud de onda de la radiación.

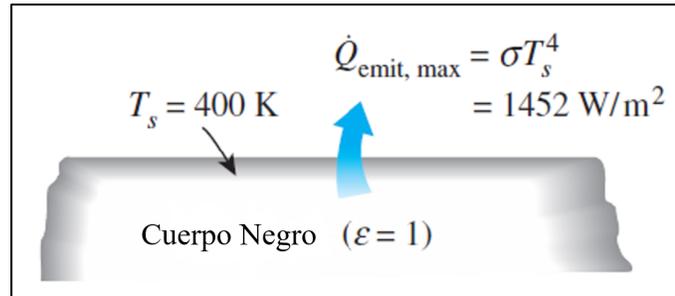


Figura 2.7: Radiación de cuerpo negro. Representa la máxima cantidad de radiación que puede emitir un cuerpo [1].

La *ley de Kirchhoff* de la radiación establece que la emisividad y absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dada son iguales. La tasa a la que una superficie absorbe radiación se puede observar en la figura 2.8 (ecuación 2.8). En superficies opacas (no transparentes), la porción no absorbida de radiación por la superficie es reflejada hacia atrás.

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (W) \quad (2.8)$$

Dónde:

- $\dot{Q}_{absorbida}$: es la porción de radiación absorbida por una superficie.
- $\dot{Q}_{incidente}$: es la tasa a la que incide la radiación sobre una superficie.
- α : es la absorptividad de la superficie.

La diferencia entre la tasa de radiación emitida por un cuerpo y la radiación que absorbe es la transferencia de calor neta [1] [2] [12]. Si la radiación absorbida es mayor que la emitida, entonces la superficie está ganando energía por radiación,

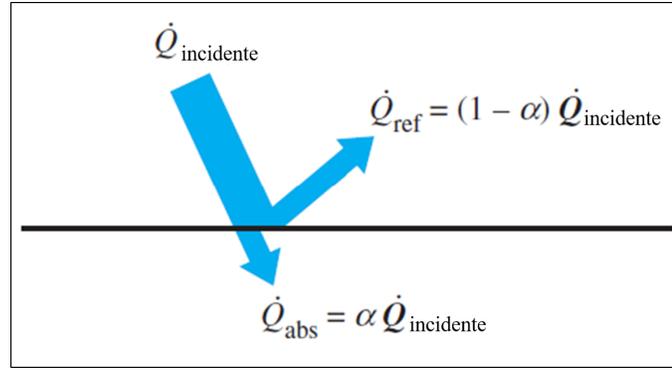


Figura 2.8: La absorción de radiación que incide sobre una superficie opaca [1].

pero si la radiación emitida es mayor, se refiere a que está perdiendo energía por radiación.

En el caso de la transferencia de calor por radiación entre una superficie y sus alrededores (figura 2.9), la tasa neta de transferencia es determinada por la ecuación 2.9. En éste caso la emisividad y el área de los alrededores no tienen efecto en la transferencia de calor.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_S^4 - T_{surr}^4) \quad (W) \quad (2.9)$$

Dónde:

- \dot{Q}_{rad} : es la tasa neta de radiación entre la superficie y el espacio circundante.
- T_{surr} : es la temperatura del espacio circundante.

La transferencia de calor por una superficie rodeada por un gas ocurre mediante conducción (o convección, si existe movimiento del gas) entre la superficie y el gas. El total de la transferencia de calor se determina mediante la adición de los dos mecanismos de transferencia de calor (ecuación 2.10). Esto es llamado coeficiente de transferencia de calor combinado, y conjunta los efectos de la convección y radiación.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{total} &= \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = h_{conv} A_S (T_S - T_{surr}) + \varepsilon \sigma A_S (T_S^4 - T_{surr}^4) \\ \dot{Q}_{total} &= h_{combinado} A_S (T_S - T_{\infty}) \quad (W) \quad (2.10) \\ h_{combinado} &= h_{conv} + h_{rad} = h_{conv} + \varepsilon \sigma (T_S + T_{surr}) (T_S^2 + T_{surr}^2) \end{aligned}$$

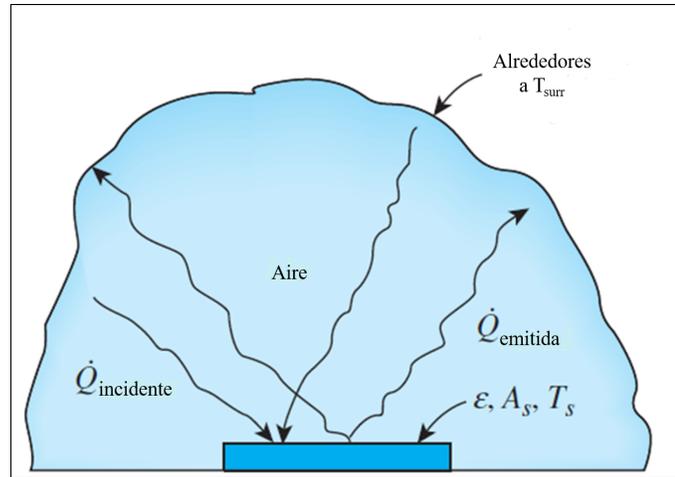


Figura 2.9: Transferencia de calor por radiación entre una superficie y sus alrededores [1].

Dónde se muestra el coeficiente de convección que incluye los efectos de la radiación ($h_{\text{combinado}}$). La radiación es significativa en contraste con la conducción o la convección natural, pero insignificante en relación con la convección forzada, por lo tanto es descartada en aplicaciones de ésta, especialmente cuando la superficie involucrada tiene baja emisividad y temperatura [1].

2.2 SIMULACIÓN

La simulación es el desarrollo de un modelo lógico-matemático de un sistema, tiene como objetivo generar una imitación de la operación de un proceso a través del tiempo. Involucra una historia artificial de un sistema, mediante la manipulación experimental, obteniendo las características operacionales de dicho sistema. En la definición anterior se citan dos etapas básicas de la simulación: *desarrollo de un modelo* y experimentación. El desarrollo del modelo incluye la construcción de ecuaciones lógicas representativas del sistema y la preparación de un programa computacional. Una vez que se ha validado el modelo del sistema, la segunda fase del estudio de simulación entra en escena, la experimentación, en esta etapa se desarrollan los resultados del sistema modificando algunas variables de entrada.

Los términos «*sistema*» y «*modelo*» también son importantes en la definición descrita. Un sistema es una colección de variables que interactúan entre sí dentro de ciertos límites para lograr un objetivo. El modelo por su parte es una representación de los objetos del sistema y refleja de manera sencilla las actividades en las cuales esos objetos se encuentran involucrados.

2.2.1 SISTEMA

Un sistema es un conjunto de componentes que interactúan entre sí. Cada sistema posee límites espaciales y temporales, están rodeados e influenciados por su entorno, descritos por su estructura y propósito, así como expresados en una función. Algunos campos que estudian las propiedades generales de los sistemas involucran la ciencia de sistemas, teoría de sistemas, modelado de sistemas, ingeniería de sistemas, termodinámica, sistemas complejos y análisis de sistemas e investigan las propiedades abstractas de la materia y organización de los sistemas en busca de conceptos y principios que son independientes del dominio, sustancia, tipo o escala temporal.

El termino sistema también se puede relacionar a un conjunto de normas que regulan la estructura y comportamiento. Al mismo tiempo, usualmente el contexto de clases sociales complejas, mientras que el término institución se utiliza para describir las reglas que gobiernan su estructura y comportamiento.

2.2.2 MODELO

Un modelo matemático se refiere a la representación abstracta, análoga, fenomenológica o idealizada, de un objeto que puede ser real o ficticio (representación matemática y/o computacional de un sistema) [14]. Con el uso del modelado se busca mejorar el conocimiento y la comprensión de un fenómeno o proceso, e involucra el estudio de la interacción entre las partes de un sistema y del sistema como un todo. Desde este enfoque se afirma que dos grandes elementos conceptuales se integran a las teorías de modelación: un *formalismo*; es un instrumento matemático con reglas operativas para calcular, y una *interpretación*; que es una ontología informativa la cuál es la forma de los fenomenos, de los procesos y del todo que la teoría pretende explicar. El modelado permite acercar el formalismo científico a una interpretación con el fin de obtener una mejor comprensión del sistema estudiado.

La efectividad de los modelos matemáticos como herramientas científicas para tomar decisiones sobre procesos de ingeniería, depende del nivel de confianza que pueda lograrse, dentro de los rangos relevantes, entre el modelo y el sistema real representado.

2.2.2.1 CREACIÓN DE UN MODELO

El proceso de modelación y su metodología depende de la naturaleza del problema, propósito y objetivo de ésta [3]. El procedimiento de modelación se muestra en la figura 2.10. Para una definición del problema se necesitan conocer los propósitos

y objetivos de éste, también se deben conocer los datos a utilizar. La simplificación del problema consta en utilizar suposiciones para hacer el problema más sencillo y se pueda resolver con facilidad y precisión. La solución del problema en tiempo espacio y subsistemas es relizar un modelo de una, dos o tres dimensiones, dependiendo del análisis utilizado para obtener la solución requerida.

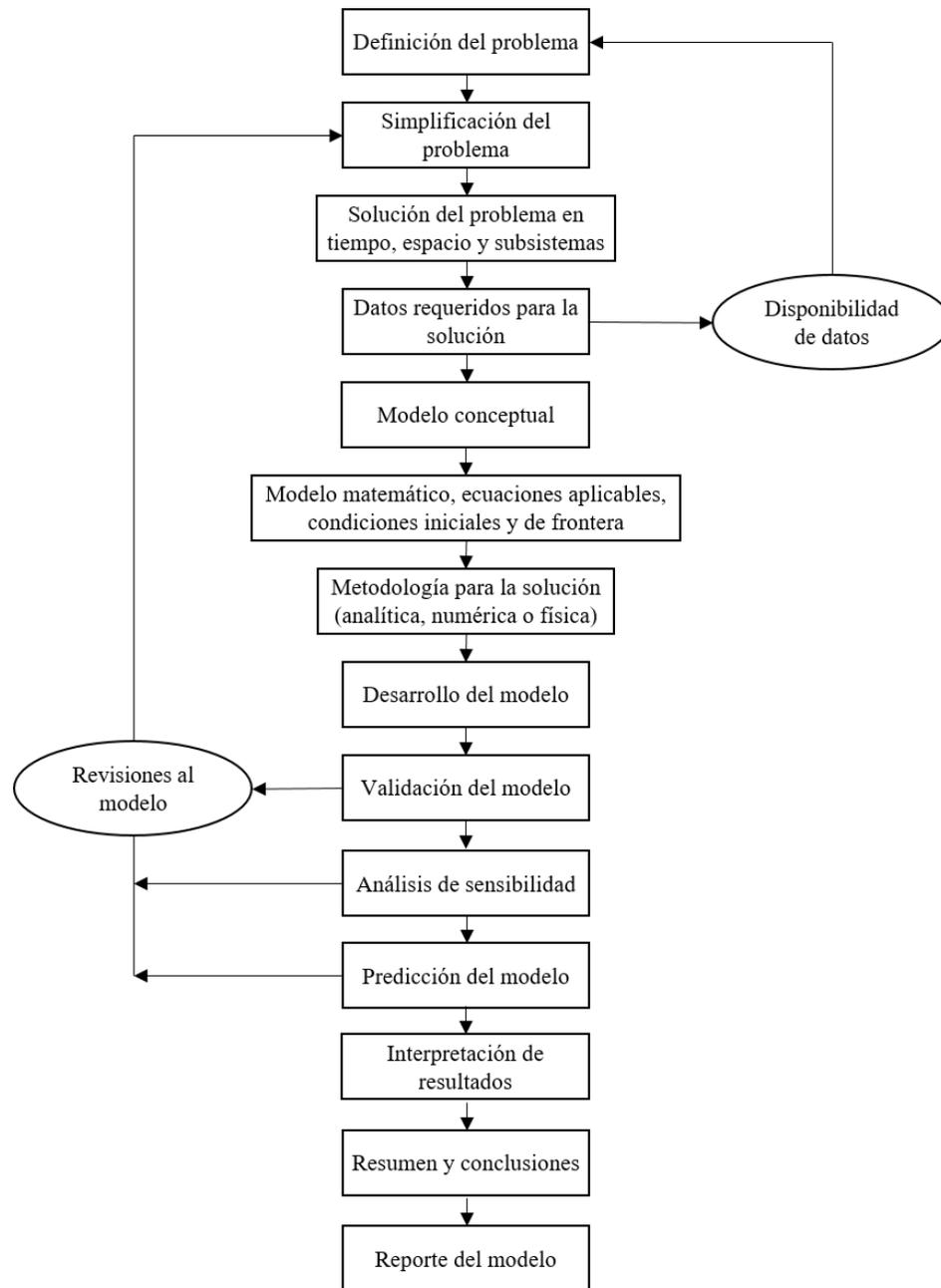


Figura 2.10: Procedimiento de modelación por método de elementos finitos [3].

La recolección de datos requeridos para la solución puede ser sencilla o compleja dependiendo el problema a resolver y su disponibilidad debe ser investigada previamente, la calidad de los datos repercute en la eficiencia de la predicción del modelo. De los pasos anteriores se deriva un modelo conceptual que ayudara a reducir la dificultad del problema real en versiones simplificadas que facilitaran su resolución. El modelo conceptual se expresa en un modelo matemático utilizando ecuaciones en las que se agregan las condiciones iniciales y de frontera. De éste modelo previo obtenemos la metodología de solución del problema y dependiendo de su complejidad puede ser analítica, numérica o física. En caso de que no exista un modelo que resuelva el problema, es necesario desarrollarlo con los objetivos particulares de la modelación y para algunos casos se utiliza la ayuda de una computadora. Posteriormente, se realiza una validación del modelo, que asegure que éste incluya y describa todos los datos y procesos relevantes. La solución obtenida debe ser verificada y comparada con soluciones similares. Los resultados obtenidos deben ser interpretados apropiadamente considerando el comportamiento de las variables del modelo y se deben reportar asegurandose que son claros y concisos.

2.2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El de elementos finitos (MEF o FEM por sus siglas en inglés) es uno de los métodos numéricos utilizados para resolver ecuaciones diferenciales que describen problemas de ingeniería. El MEF se originó a partir de la disciplina de la mecánica estructural y desde entonces se ha extendido a otras áreas de la mecánica de sólidos, así como la a transferencia de calor, la dinámica de fluidos y electromagnetismo.

La transformación de un modelo de ingeniería con incógnitas infinitas en un modelo de elementos finitos (figura 2.11) es un paso importante en la simulación y requiere un profundo conocimiento del MEF. Un modelo de elementos finitos consta de una idealización matemática de un sistema real cuyo comportamiento deberá ser intuido, pues de otro modo la modelación puede ser imposible.

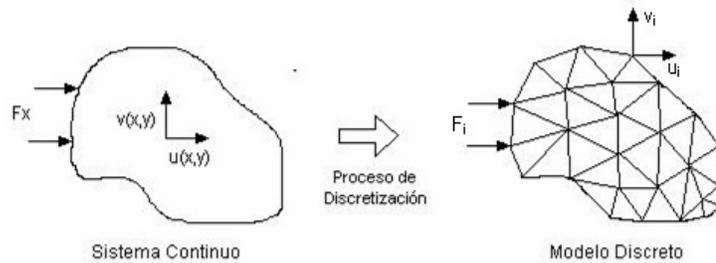


Figura 2.11: Discretización de un modelo de ingeniería.

El término elementos finitos resume el concepto básico del método; se trata de la transformación de un sistema físico, con un número infinito de incógnitas, a uno que tiene un número finito de incógnitas relacionadas entre sí por elementos de un tamaño finito y básicamente se refiere a la búsqueda de una solución a un problema complicado mediante el reemplazo de éste por uno más simple, así seremos capaces de obtener solo una solución aproximada en lugar de la solución exacta, debido a la inexistencia de herramientas matemáticas suficientes para encontrar la solución exacta (y algunas veces, incluso para encontrar la solución aproximada) de la mayoría de los problemas que se presentan en la vida cotidiana [15].

2.2.3.1 ¿CÓMO FUNCIONA?

En ingeniería, los problemas de naturaleza continua poseen un número infinito de variables. El proceso de discretización (figura 2.11) divide el problema de elementos para simplificarlo reduciendo a uno el número de incógnitas. Posteriormente, el problema se expresa en términos de una aproximación asumida dentro de cada elemento. Las funciones de interpolación se expresan en términos de valores del conjunto de variables en nodos específicos. Los nodos se sitúan en la frontera del elemento, dónde se considera que los elementos adyacentes están conectados [3].

El problema es definido por los valores de los nodos del cuerpo y las funciones de interpolación del elemento dentro de los elementos. Así, los valores de los nodos se

convierten en las nuevas incógnitas del problema representado por elementos finitos. Una vez que se obtiene esta representación, las funciones de interpolación definen la variable del cuerpo en todo el conjunto de elementos del problema, por lo tanto, las soluciones son formuladas para elementos individuales antes de unirlos para representar el problema. La naturaleza y grado de precisión de la solución depende del tamaño, número de elementos y el tipo de función de interpolación utilizado. Las funciones de interpolación son elegidas de manera que la variable del cuerpo son continuas a través de los límites de los elementos adyacentes.

2.2.4 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

Diferencias finitas (MDF o FDM por sus siglas en inglés), al igual que el MEF, es uno de los métodos numéricos aplicado universalmente para la resolución de ecuaciones diferenciales utilizando ecuaciones diferenciales finitas para aproximar derivadas. Mediante un proceso de discretización, el conjunto infinito de números representan la función incógnita, para después ser reemplazado por un número finito de parámetros incógnita.

Una diferencia finita es una expresión matemática de la forma $f(x + b) - f(x + a)$, en dónde, si se divide una diferencia finita entre $b - a$ se obtiene una expresión cercana al cociente diferencial, empleando cantidades finitas en lugar de infinitesimales.

2.2.5 MÉTODO ITERATIVO

Un «método iterativo» es un procedimiento matemático que consiste en una serie de aproximaciones sucesivas a la solución de un tipo de problema. Los métodos iterativos son útiles para resolver problemas que tienen un número grande de variables. Existen dos tipos de métodos iterativos: *métodos estacionarios* y *métodos no*

estacionarios [16].

Los métodos estacionarios son simples de entender e implementar, pero no son muy efectivos, mientras, los en métodos no estacionarios, el análisis es más complicado, pero tienden a ser muy efectivos. Los métodos estacionarios más utilizados son el *Jacobi* y el *Gauss - Seidel*, él último explicado en la siguiente sección debido a que es el de interés en este proyecto.

2.2.5.1 MÉTODO GAUSS-SEIDEL

El «método iterativo de Gauss - Seidel» se emplea en la solución de ecuaciones algebraicas lineales [12]. Consiste en obtener una ecuación matricial y proponer un vector solución inicial, para después realizar las iteraciones necesarias hasta que la diferencia entre los vectores consecutivos cumpla con la tolerancia definida. Un ejemplo de solución mediante el método de Gauss - Seidel es la ecuación 2.11:

$$\begin{aligned}
 a_{11}T_1 + a_{12}T_2 + a_{13}T_3 + \cdots + a_{1N}T_N &= C_1 \\
 a_{21}T_1 + a_{22}T_2 + a_{23}T_3 + \cdots + a_{2N}T_N &= C_2 \\
 \vdots \quad \quad \quad \vdots & \\
 a_{N1}T_1 + a_{N2}T_2 + a_{N3}T_3 + \cdots + a_{NN}T_N &= C_N
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

El método iterativo de Gauss - Seidel se aplica para cierto número de ecuaciones diferenciales. Para la aplicación del método a la ecuación 2.11, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Las ecuaciones deben reordenarse de manera que proporcione elementos diagonales cuyas magnitudes sean mayores que aquellos elementos en la misma fila. La secuencia debe quedar de tal manera que $|a_{11}| > |a_{12}|, |a_{13}|, \dots, |a_{1N}|$; $|a_{22}| > |a_{21}|, |a_{23}|, \dots, |a_{2N}|$; etc.
2. Después de reordenar, cada ecuación «N» debe expresarse de forma explícita para el valor asociado con su elemento diagonal. Cada valor (por ejemplo; de

temperatura) debe tener la siguiente forma (ecuación 2.12) en la solución [12]

$$T_i^{(k)} = \frac{C_i}{a_{ii}} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{a_{ij}}{a_{ii}} T_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^N \frac{a_{ij}}{a_{ii}} T_j^{k-1} \quad (2.12)$$

dónde $i = 1, 2, \dots, N$; k se refiere al nivel de iteración.

3. Un valor inicial ($k = 0$) es asumido para cada temperatura T_i . Los cálculos subsecuentes deben ser reducidos seleccionando valores iniciales basados en estimaciones lógicas de la solución actual.
4. Si $k = 1$ en la ecuación 2.12, los valores de $T_i^{(1)}$ se calculan mediante los valores asumidos de T_j . Ésta es la primera iteración ($k = 1$).
5. Utilizando la ecuación 2.12, el procedimiento de la iteración continúa con el cálculo de los nuevos valores de $T_i^{(k)}$ de los valores de la iteración actual ($T_j^{(k)}$), dónde $1 \leq j \leq i - 1$, y los valores de la iteración previa ($T_j^{(k-1)}$), dónde $i + 1 \leq j \leq N$.
6. La iteración finaliza cuando un criterio de convergencia preescrito es alcanzado. El criterio se expresa de la siguiente forma:

$$|T_i^k - T_i^{k-1}| \leq \varepsilon \quad (2.13)$$

dónde ε , representa el error considerado como aceptable en los cálculos de temperatura.

Si el paso 1 es completado para cada ecuación, el sistema resultante es diagonalmente dominante, y la tasa de convergencia se maximiza y el número de iteraciones se reduce. La forma de calcular los valores de T_i en los pasos 4 y 5 debe tomarse en cuenta, debido a que una iteración particular de T_i se calcula secuencialmente utilizando las estimaciones más recientes del otro T_i . Esta característica está implícita en la ecuación 2.12, debido a que los valores de cada valor desconocido es actualizado lo más rápido posible [12], es decir, $1 \leq j \leq i - 1$ [12].

CAPÍTULO 3

TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO (PCBs)

Las tarjetas de circuito impreso, mejor conocidas como «*PCBs*» (Printed Circuit Boards por sus siglas en inglés), son la plataforma en donde componentes electrónicos como microchips, capacitores y resistencias son montados, y proporciona las interconexiones eléctricas entre dichos componentes [17]. Se utilizan en numerosas aplicaciones, por ejemplo en aparatos electrónicos tales como celulares, tablets, computadoras, radios, televisores, por mencionar algunos; en la industria automotriz se utilizan en el panel de instrumentación del automóvil dónde se encuentran los indicadores de gasolina, temperatura del motor, velocidad, revoluciones por minuto, entre otros (figura 3.1).



Figura 3.1: a) Tarjeta de circuito impreso (PCB) utilizado en la industria automotriz, b) tablero de automóvil.

3.1 MATERIALES DE LOS PCBs

Los materiales base de los PCBs se constituye de tres componentes; un sistema de resina, el material de refuerzo y lámina conductora [7] [18]:

SISTEMA DE RESINA: El sistema de resina se constituye de grupos epoxi (polímero termoestable) multifuncionales. En la figura 3.2 se muestran los monómeros de epoxy utilizados en el sistema que resultan de un entrecruzamiento durante el sistema de curado de la polimerización de un compuesto organico llamado DGEBA (diglicidil éter de bisfenol A) [4]. Generalmente se le agregan agentes de curado, retardantes de flama y cargas al sistema de resina para mejorar sus propiedades.

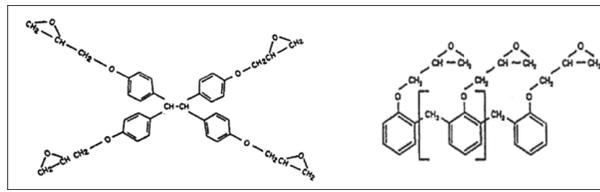


Figura 3.2: Sistemas multifuncionales de monómeros epoxy [4].

MATERIAL DE REFUERZO: La fibra de vidrio es utilizadamente como refuerzo en los PCB debido a que lo provee de resistencia mecánica y propiedades eléctricas. La composición típica de la fibra de vidrio es dióxido de silicio (SiO_2) 52-56 %, óxido de calcio (CaO_2) 16-25 %, óxido de aluminio (Al_2O_3) 12-16 %, óxido de boro (B_2O_3), entre otros [4]. En la figura 3.3 se muestran los diferentes estilos de fabricación según la densidad y espesor deseados.

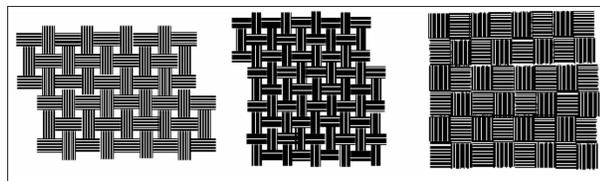


Figura 3.3: Estilos de fibra de vidrio usados en PCBs [4].

LÁMINA CONDUCTORA: El material conductor utilizado es cobre (Cu) y es el encargado de la conducción eléctrica del material. La lámina de cobre es depositada electrolíticamente en el PCB para obtener los trazos que recubren el preimpregnado formado por la resina y la fibra de vidrio (figura 3.4) [4].

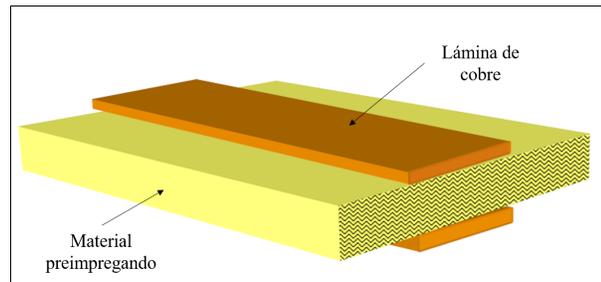


Figura 3.4: Trazos de cobre que revisten al material preimpregnado.

En la figura 3.5 se muestra una imagen por microscopía electrónica de barrido en la cual se señala la composición de un PCB FR-4 de siete capas de fibra de vidrio preimpregnadas en resina epóxica con las capas de cobre en la parte superior e inferior de la imagen. El FR-4 es un material compuesto comúnmente utilizado en PCBs [7], el cuál se compone de capas de fibra de vidrio impregnadas con una resina epóxica y contiene otros materiales que le dan propiedades específicas (tabla 3.1). Las propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas que le caracterizan hacen del FR-4 un material excelente para una amplia gama de aplicaciones (computadoras, telecomunicaciones, aeroespacial, industria automotriz).

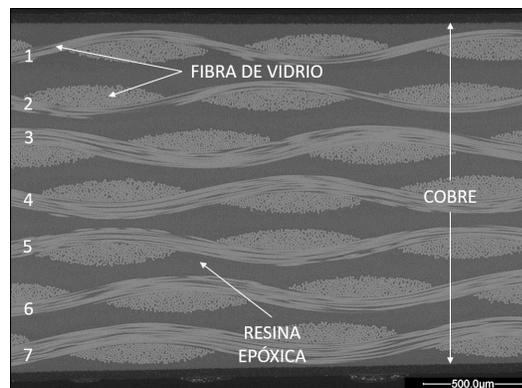


Figura 3.5: Materiales que componen los PCBs.

Tabla 3.1: Materiales típicos de una tarjeta FR-4 [4].

Material	Función
Refuerzo	Provee resistencia mecánica y propiedades eléctricas.
Agentes de acoplamiento	Une fibras inorgánicas con resinas orgánicas y transfiere los esfuerzos a través de la matriz.
Resina	Transfiere cargas térmicas y mecánicas; realiza la función de matriz.
Agentes de curado	Mejora la polimerización en la resina.
Retardante de Flama	Reduce la flamabilidad del material.
Cargas	Reduce la expansión térmica.
Aditivos	Aumentan la tasa de reacción, reducen la temperatura de curado, controla densidad de entrecruzamiento.

Para que un PCB sea funcional, es necesario que contenga todos los componentes electrónicos que son incorporados en una línea de producción (figura 3.6), este procedimiento se logra aplicando soldadura libre de plomo al PCB y posteriormente, de manera automatizada los componentes son colocados en la tarjeta.

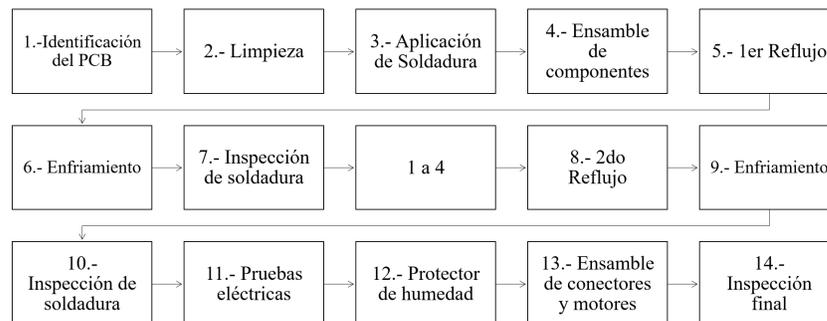


Figura 3.6: Diagrama de proceso de PCB.

3.2 MANUFACTURA DE PCBs

En 2003 la directiva sobre la restricción de sustancias peligrosas (RoHS, Restriction of Hazardous Substances) y la directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (WEEE, Waste Electrical and Electronic Equipment) [19] [20], prohibieron el uso de soldaduras compuestas de plomo. Por tal motivo la industria de los PCBs tuvo que reajustar sus procesos para implementar soldaduras libres de plomo para el montaje de componentes en el PCB. La soldadura libre de plomo como la SAC (Sn-Ag-Cu) requiere normalmente un aumento en el pico de temperatura de $\approx 30 - 40^\circ\text{C}$ durante periodos de tiempo más prolongados (figura 3.7) [5], en comparación con las condiciones utilizadas con la soldadura de Sn-Pb eutéctica, cuyo punto de fusión es de $\approx 180^\circ\text{C}$ (figura 3.8) [21].

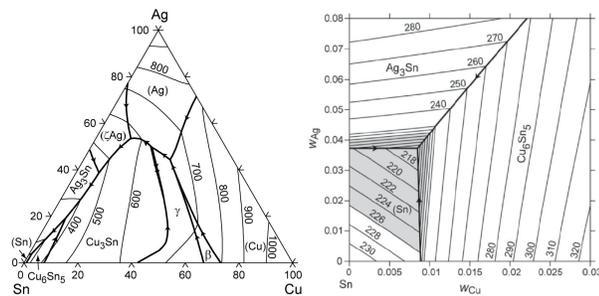


Figura 3.7: Diagrama de fases de la soldadura SAC [5].

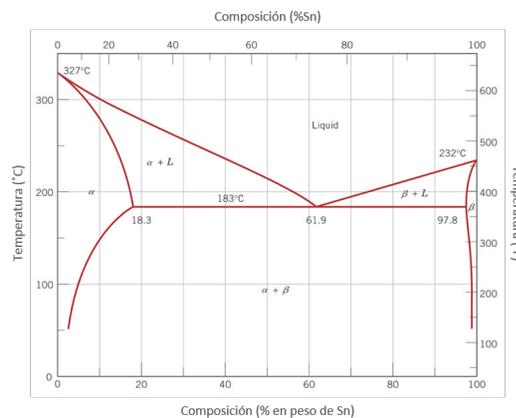


Figura 3.8: Diagrama de fases de la soldadura Sn-Pb.

Para garantizar la unión de los componentes, es necesario exponer el PCB a temperaturas de hasta $\approx 280^{\circ}\text{C}$ dentro del horno de reflujo y un posterior enfriamiento forzado a un mínimo de temperatura de $\approx 13^{\circ}\text{C}$ (figura 3.9). Estas exposiciones alteran las propiedades de los materiales del PCB, provocando deformaciones conocidas como «arqueamiento» (del inglés *bow*) y «torcedura» (del inglés *twist*) (figura 3.10) [6] [22], a las que se les engloba con el término «distorsión» (del inglés *warpage*) y se caracteriza por la deformación del material debido a la diferencia de propiedades térmicas entre los materiales que lo conforman y provoca cambios en la fiabilidad prevista del PCB y de los componentes electrónicos montados en él.

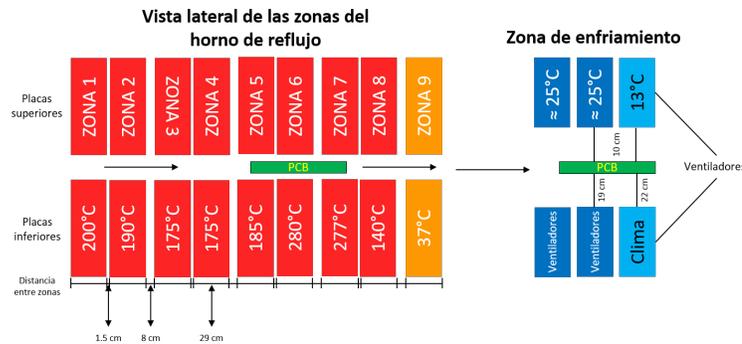


Figura 3.9: Diagrama del proceso de reflujo.

En la figura 3.10a, el «arqueamiento» es la deformación de un PCB que se caracteriza por su desviación de la planitud formando una curvatura esférica (formando un arqueamiento, señalados con los números 1 y 2) en ambos lados de la tarjeta y sus cuatro esquinas permanecen en el mismo plano. En la figura 3.10b, la «torcedura» es la deformación de un PCB que se produce por el levantamiento de la planitud de una de las cuatro esquinas, de manera que no permanece en el mismo plano en el que se encuentran las tres esquinas restantes (señaladas con las letras A, B y C).

Hoy en día las comunidades científica e industrial, se han dado a la tarea de entender el desempeño termo-mecánico mediante caracterización térmica de los materiales y la adición de aditivos/cargas en el PCB [23], así como el estudio a profundidad de las condiciones del horno de reflujo [9] [24] [25].

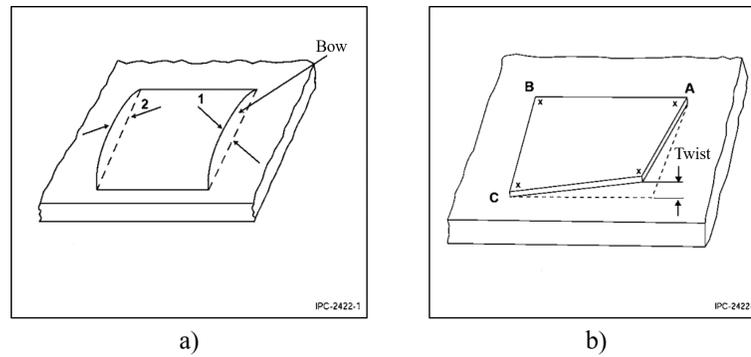


Figura 3.10: Tipos de distorsión en los PCBs; a) arqueamiento y b) torcedura [6].

3.2.1 PROCESO DE REFLUJO

El reflujo es el proceso en el cuál pasta de soldadura (mezcla de soldadura en polvo y fundentes) es usada temporalmente para unir uno o más componentes eléctricos a sus almohadillas de contacto, es sometida a cargas de calor controlado en donde fluye la soldadura y adhiere el componente al PCB sin sobrecalentar o dañar los componentes electrónicos.

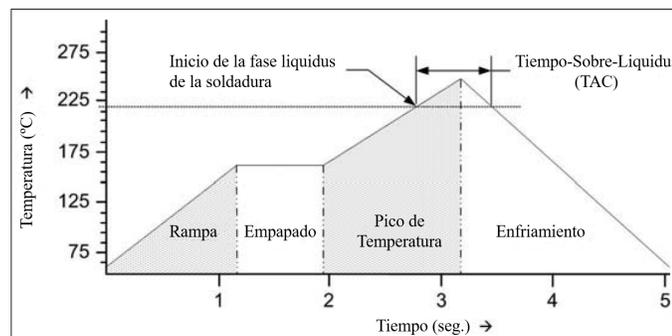


Figura 3.11: Ejemplo de perfil de temperatura en un proceso de reflujo [7].

En el proceso de reflujo existen normalmente cinco fases (figura 3.11), llamadas zonas, cada una con diferente perfil de temperatura. Estas fases son:

1. Evaporación: se evaporan los solventes de la pasta de soldar.
2. Activación: se activa el fundente y se deja que actúe.

3. Precautado: se precalientan cuidadosamente los componentes y la tarjeta de circuito impreso.
4. Reflujo: la soldadura alcanza su punto de fusión y empieza a fluir para permitir la unión de los componentes en la tarjeta.
5. Enfriamiento: se enfría la tarjeta a una velocidad controlada y a una velocidad de entre 5 y 100 pulgadas/minuto mediante convección forzada.

3.2.2 HORNO DE REFLUJO

El horno de reflujo (figura 3.12) se utiliza principalmente para la soldadura de los componentes que son ensamblados en la superficie de los PCBs [7]. El horno se compone de diferentes zonas de calentamiento y de enfriamiento a temperaturas determinadas (figura 3.13).



Figura 3.12: Horno de reflujo Furukawa XNK-745.

La fuente de calor normalmente consiste de ventiladores que arrojan aire caliente (comúnmente utilizadas en combinación con calentadores infrarrojos de cerámica) con el fin de forzar el aire caliente hacia la tarjeta y de esa forma hacer fluir la pasta de soldadura, son llamados hornos de convección.

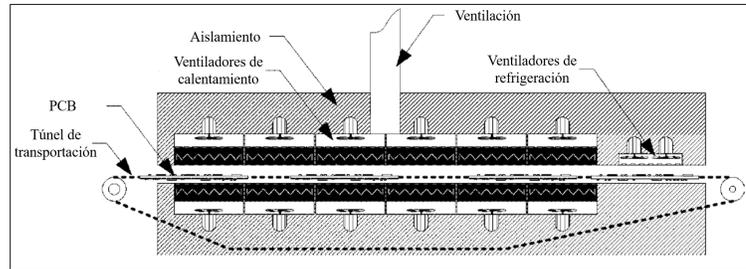


Figura 3.13: Vista de la sección transversal de un horno de reflujo [7].

3.2.2.1 HORNO DE REFLUJO DE CONVECCIÓN FORZADA

El horno de convección forzada es el de más utilidad en procesos de fundición de soldadura por reflujo debido a su confiabilidad y precisión. Funciona mediante la circulación de aire caliente a alta velocidad en el túnel del horno [7]. Este tipo de horno es el utilizado en el proceso de reflujo de éste trabajo de investigación.

MÓDULO DE REFLUJO POR CONVECCIÓN FORZADA: El calentamiento se lleva a cabo principalmente mediante el flujo de aire caliente a través de placas con orificios que distribuyen el aire dirigido a las superficies superior e inferior del PCB (figura 3.14) que se encuentra en la línea de transportación, logrando tener un control térmico uniforme en el proceso de reflujo. En la figura 3.14 se hace una descripción del funcionamiento de un horno de reflujo por convección forzada: el aire frío (a) se extrae a través del calentador de resistencia (b) mediante un ventilador. El aire calentado (c) es forzado a través de unas placas con orificios para que sea distribuido en la superficie del PCB (e), que está montado en el transportador (f). Un segundo conjunto de módulos de calentamiento es dirigida a la parte inferior del PCB. Algunos módulos más se disponen a través del horno para el control del perfil térmico del PCB.

ENFRIAMIENTO: Algunos hornos dependen de la refrigeración pasiva para disminuir la temperatura en el proceso de soldadura de los PCBs. En el proceso, la tarjeta atraviesa las zonas del horno carentes de enfriadores. Esto resulta adecuado para

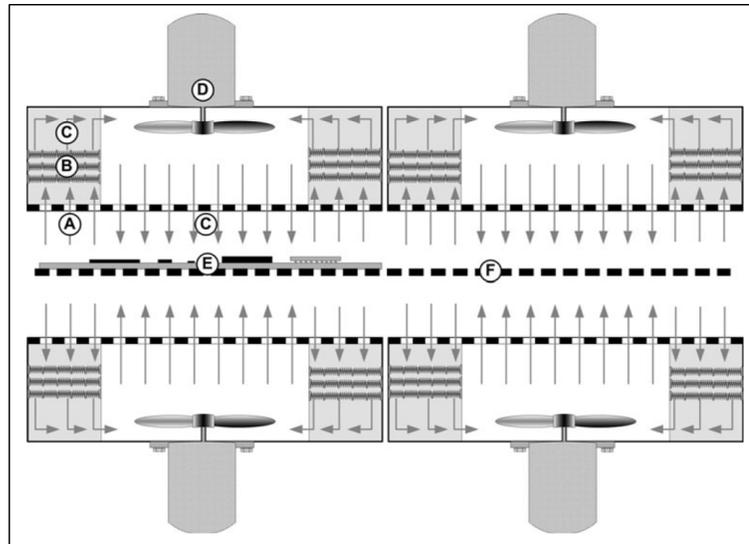


Figura 3.14: Módulo de calentamiento por convección forzada [7].

tarjetas delgadas con baja masa térmica, pero para las tarjetas de multicapa, es necesario implementar algún método o sistema de enfriamiento para asegurar que las juntas de la soldadura serán sólidas al salir la tarjeta del horno. Para lograr esto, muchos hornos incorporan un área de enfriamiento activo después de la última zona de calentamiento del horno (figura 3.15). El tipo de refrigeración activa empleada por esta área puede ser: enfriamiento por aire forzado por ventiladores es la más común en estos sistemas. Los ventiladores pueden estar situados en la parte superior, en la parte inferior o una combinación de ambos. En la figura 3.15 se muestra un sistema por convección forzada de enfriamiento con 12 módulos en la parte superior e inferior (a). Cada módulo es controlado independientemente. Los últimos módulos (b) son de refrigeración activa para que la soldadura de la tarjeta alcance su fase solidus antes de la salida del PCB del horno. Este sistema utiliza ventiladores para el enfriamiento, soplando sobre radiadores enfriados por agua.

VENTILACIÓN: La ventilación es importante desde un punto de vista de higiene industrial, Además del efecto que tiene en el proceso de soldadura de componentes electrónicos. Durante el proceso de reflujo cantidades pequeñas de óxidos metálicos suelen acumularse en la atmósfera del horno o en las superficies del túnel del horno y

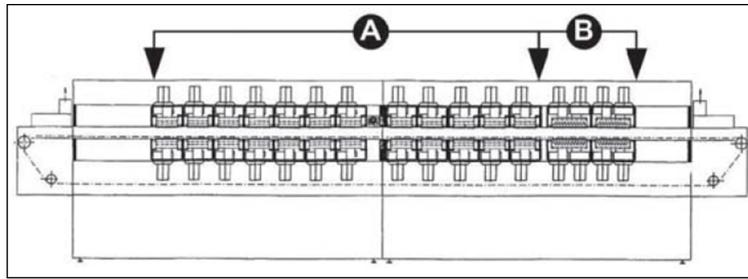


Figura 3.15: Módulo de enfriamiento por convección forzada [7].

es muy peligrosa su inhalación. La velocidad de ventilación es un factor importante a tener en cuenta, si existen velocidades muy altas afectarían el desempeño del horno provocando mal funcionamiento en el proceso de reflujo.

En los últimos años se han estado desarrollando investigaciones en la simulación mediante el análisis de elementos finitos (FEA), las cuáles en su aplicación en conjunto con los conocimientos obtenidos de las condiciones del horno de reflujo, podrían ser de gran utilidad en la predicción de defectos provocados por el warpage en el proceso de manufactura de PCBs.

3.3 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN PCBs

Para establecer la hipótesis de éste trabajo de tesis, se llevó a cabo una revisión y análisis del estado del arte referente al estudio de la deformación de los PCBs y su comportamiento en el horno de reflujo. A continuación, se describen algunos de estos trabajos, entre los cuales se hace énfasis en el estudio de las condiciones y características del horno de reflujo y simulaciones por análisis de elementos finitos.

En 1991 D.C. Whalley y colaboradores [26], implementaron un modelo para simular el proceso de reflujo en dos diferentes hornos, agregando un coeficiente de convección térmica en la zona de enfriamiento. En el mismo año, C.P. Yeh y cola-

boradores [27], utilizaron análisis de elementos finitos para simular una tarjeta de circuito impreso sin componentes (Printed Wiring Board, PWB) y validar la aproximación analítica, también realizaron mediciones experimentales del pandeamiento por separado.

En 1996 F. Sarvar y P. Conway [28], modelaron un proceso transitorio de reflujo, considerando que las propiedades térmicas varían con el cambio de temperatura; también, implemento un procedimiento experimental para comparar sus resultados de la simulación. En 1997 I.C. Ume y colaboradores [29], utilizaron análisis de elementos finitos para estudiar los efectos del proceso de solder masking en el warpage de un PWA (tarjeta sin componentes). En el artículo se hace mención que, en la literatura previa, ningún documento hace referencia al modelado por análisis de elementos finitos del warpage causado por el proceso de solder mask, pero si han sido utilizados para problemas con el flujo y transferencia de calor en componentes electrónicos.

Más tarde, en 2002, D.C. Whalley [30], propuso un modelo simplificado. El considero la conductividad térmica y la radiación para predecir la temperatura en cada zona del horno, utilizo diferentes técnicas para comparar su modelo con el ensayo. En el mismo año, K.S. Beh y colaboradores [31], utilizaron análisis por elementos finitos para estudiar los cambios en las propiedades del PCB debido la distorsión y la variación en los parámetros del diseño.

Motohiro y colaboradores en 2004 [8], desarrollaron un nuevo diseño de flujo de aire en el horno, mejorando el coeficiente de convección térmica, « h », con el cambio de diámetro de las boquillas del horno (figura 3.16). En el mismo año, Halvi y colaboradores [32], investigaron el pandeamiento en un PCB de multicapas de resina, fibra de vidrio y cobre, los autores se enfocaron en el efecto que causaba la distorsión en cada una de las capas mediante un análisis inducido térmicamente por un modelo de elementos finitos. Un año después, en 2005 Etsuko y colaboradores [33], se enfocaron en el desempeño de calentamiento y enfriamiento, flujo de aire,

control de oxígeno y nitrógeno, etc.; mejoraron el diseño de las boquillas en la zona de reflujo, creando un flujo de aire uniforme y removieron la capa resistente de calor.

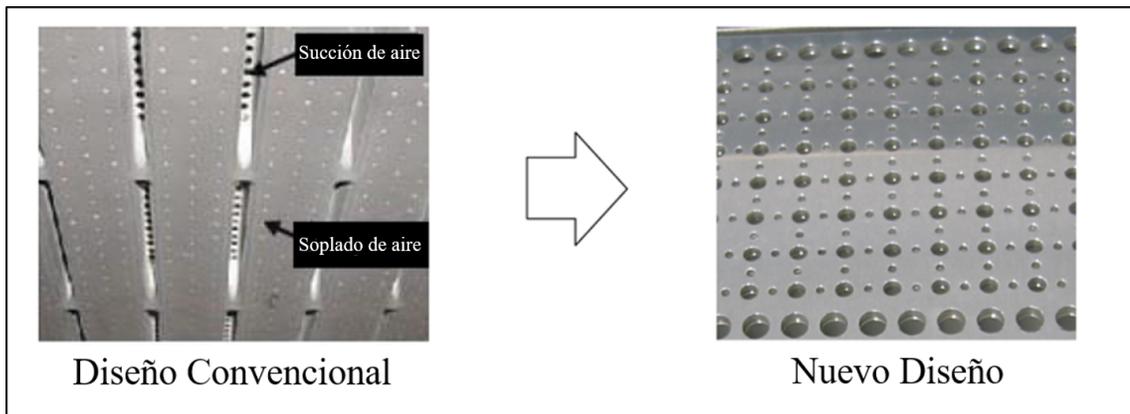


Figura 3.16: Configuración de boquillas del horno de reflujo [8].

Inoue y Koyanagawa en 2005 [34], introdujeron un método de simulación térmica transitoria para detectar los puntos máximos y mínimos de temperatura en el PCB durante el proceso de reflujo, y concluyeron que el método de simulación desarrollado por ellos será una excelente herramienta para el proceso de soldadura libre de plomo. Tiempo después, en 2007 Balázs y colaboradores [9], simularon la convección térmica en las diferentes zonas del horno y en cada línea de boquillas del horno. También simularon el flujo de aire a través del PCB en una vista 3D utilizando análisis de elementos finitos (figura 3.17), concluyeron que la convección no es uniforme en las diferentes zonas del horno.

En 2011, S.W. Kim y colaboradores [35], presentan un método de simulación de la distorsión que se presenta después del proceso de reflujo utilizando análisis por elementos finitos, obteniendo resultados que coinciden con las mediciones experimentales. Con esto, comprueban que el método de simulación propuesto es lo suficientemente confiable y acertado para medir el pandeamiento asociado con el diseño de PCBs.

En 2012, Wei Tan y I.C. Ume [36], estudiaron la distorsión utilizando la teoría de laminación clásica, las propiedades se obtuvieron por la regla de las mezclas y

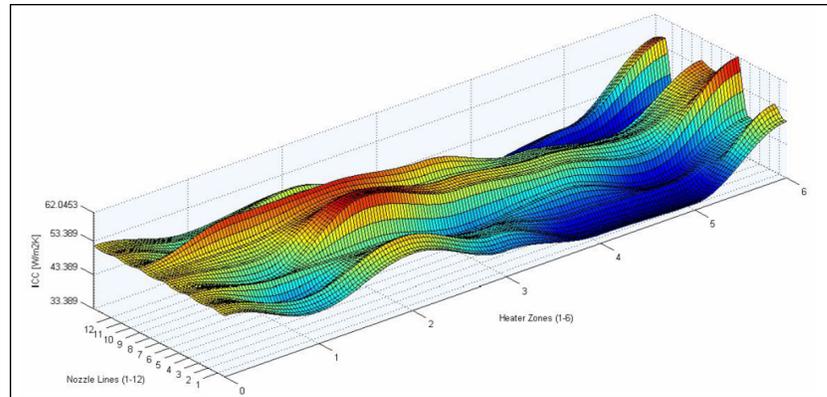


Figura 3.17: Vista en 3D de la simulación del coeficiente de transferencia de calor por convección a través de las zonas del horno [9].

las ecuaciones se obtuvieron de la teoría de laminación clásica. En 2014, M.C. Liao y colaboradores [10], propusieron un método de medición in-situ del pandeamiento utilizando medidores de deformación; concluyeron que utilizar medidores de deformación es un método óptimo para determinar el pandeamiento del PCB (figura 3.18) que resulta del proceso de reflujo.

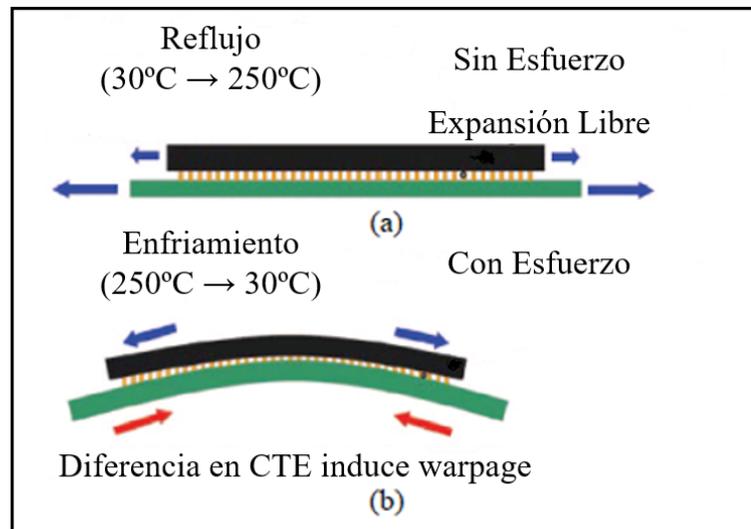


Figura 3.18: Representación gráfica de como afecta la distorsión del PCB a un componente [10].

En 2015 Soonwan Chung y colaboradores [11], trabajaron en la predicción del pandeamiento de un PCB aplicando una simulación termo-mecánica por análisis de

elementos finitos (figura 3.19), logran predecir el pandeamiento utilizando para el modelo propiedades simplificadas del material y una rampa de calentamiento lineal, así mismo los autores proponen establecer otro modelo incluyendo las propiedades mecánicas y térmicas del material en función de la temperatura en un estado transitorio a lo largo del proceso del reflujo.

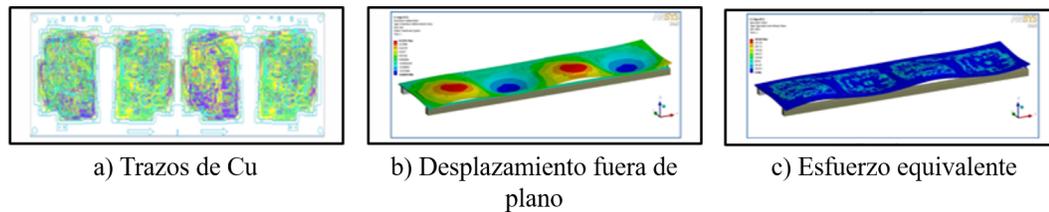


Figura 3.19: Simulación de los trazos de cobre de un PCB [11].

Del análisis del estado del arte obtenemos que las investigaciones se enfocan básicamente en las propiedades térmicas de los materiales que constituyen los PCBs y en el estudio de las condiciones del horno de reflujo. También, que el análisis de elementos finitos se ha utilizado en la simulación del desempeño termo-mecánico del PCB, prediciendo deformaciones, distribuciones térmicas y esfuerzos causados por las diferencias de temperatura.

Los modelos utilizados en la revisión de literatura consideran algunas propiedades como ideales, como perfiles de temperatura lineales, debido a esto y a la falta de datos experimentales como el coeficiente de convección térmica real, coeficientes de expansión térmica dependientes de la temperatura, se da como resultado simulaciones poco realistas.

Los trabajos científicos descritos en este apartado se consideran como fuente de inspiración y fundamento teórico en el desarrollo de este proyecto de tesis.

CAPÍTULO 4

MOTIVACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

4.1 MOTIVACIÓN

El desarrollo de tecnologías cada vez más avanzadas, requiere de la disponibilidad de materiales que cumplan especificaciones cada vez más exigentes, esto principalmente para satisfacer las necesidades de la sociedad. Uno de los requerimientos esenciales en los nuevos dispositivos electrónicos, tales como teléfonos celulares inteligentes, tabletas, televisores, cámaras digitales, computadoras portátiles, sistemas GPS en automóviles, entre otros, es el de presentar una buena calidad en los materiales y un diseño delgado para satisfacer las necesidades del cliente. Al ser utilizados en éste tipo de tecnologías, una de las características importantes que deben poseer los PCBs es la de ser delgados, sin embargo, esto produce que su resistencia a diferentes tipos de esfuerzos se reduzcan considerablemente, particularmente en el proceso de reflujo, en el cual el PCB se deforma *considerablemente* [11] [37] [18]. En la industria automotriz una de las preocupaciones distorsión (warpage) en los PCBs durante el proceso de reflujo, en el cual el PCB se deforma debido a la diferencia en las propiedades térmicas de los materiales que lo componen [10] [38]. El *warpage*, se ha considerado por años como la causa de diferentes tipos de falla en los PCBs,

como fractura de las juntas de soldadura, fallas en los componentes, cortos circuitos, etc. [39] [40]. Por lo tanto, el warpage se ha convertido en un desafío importante para las empresas, debido a que en el 2003 la RoHS (Restriction of Hazardous Substances) emitió estándares con soldadura libre de plomo, las compañías que se dedican a ensamble de electrónicos han tratado de ajustar sus procesos mediante el uso de materiales alternativos, distintas configuraciones en los hornos, pastas de soldadura de diferentes composiciones, etc., ya que este problema genera rechazos a nivel industria del orden de $\approx 2.4\%$ de la producción, lo que representa pérdidas anuales de cientos de miles de dólares. Éste problema tecnológico se presenta a nivel internacional en distintas empresas, debido a que no se comprenden suficientemente las propiedades y el comportamiento termo-mecánico de los materiales que componen a los PCBs y la compleja estructura en su conjunto. A nivel nacional también se detecta un insuficiente dominio de la ciencia y tecnología relacionada a los materiales que constituyen los PCBs.

Uno de los métodos implementados entre la comunidad científica e industrial para reducir o evitar la distorsión en los PCBs es la simulación térmica y mecánica mediante el análisis de elementos finitos, el cual ha resultado ser de gran utilidad para ingenieros y diseñadores de los procesos correspondientes al ensamble de componentes en los PCB [35], de tal suerte que ayude a predecirlo y pueda ser prevenido antes de la fabricación, modificando el proceso de reflujo o el diseño de las tarjetas para poder evitar pérdidas en la producción debido al warpage.

4.2 HIPÓTESIS

El uso de rampas de calentamiento-enfriamiento determinadas experimentalmente, así como las propiedades térmicas del material obtenidas experimentalmente, permitirán realizar una simulación por análisis de elementos finitos más realista del comportamiento de los PCB durante el proceso de reflujo.

4.3 OBJETIVOS GENERALES

Mejorar la comprensión del comportamiento de las tarjetas de circuito impreso durante el proceso de reflujo utilizando el análisis de elementos finitos, generando conocimiento que permita obtener predicciones estimadas de la distorsión de los PCBs para eventualmente proponer mejoras de diseño y/o proceso que permitan reducir o evitar la incidencia del problema.

4.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un primer modelo realista y de vanguardia que ayude a la predicción de la distorsión en los PCBs.
- Lograr una mejor comprensión del comportamiento de los PCBs durante el proceso de reflujo y enfriamiento.
- Conocer y aplicar correctamente los coeficientes de convección térmica, « h », en las nueve zonas del horno.

CAPÍTULO 5

LA SIMULACIÓN

En este capítulo se da una explicación de la metodología utilizada para la obtención de las condiciones del horno de reflujo, las temperaturas en la superficie de la tarjeta de circuito impreso y la simulación termo-mecánica, como se muestra en el diagrama de la figura 5.1. Los materiales utilizados para el proceso y las propiedades del PCB empleadas en la simulación, también son mencionados.

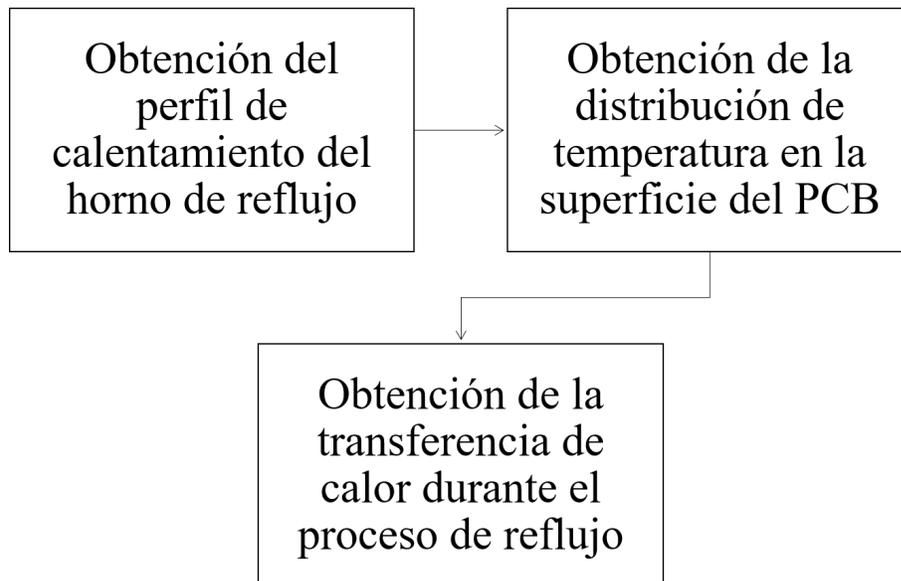


Figura 5.1: Diagrama del proceso experimental.

5.1 MATERIALES Y EQUIPO

En esta sección se mencionan los materiales y equipo utilizados en el proceso de investigación. La tabla 5.1 contiene las especificaciones de cada uno de ellos.

Tabla 5.1: Lista de Materiales.

Material	Características	Marca
PCB	FR-4	Chin-Poon
Horno de Reflujo	Convección Forzada	Furukawa
Termopares	Aleación de Chromel/Alumel	KIC
Computadora	Windows 64-Bit Intel Core i-7-4510U 2.00GHz Nvidia-Geforce-840M 8.0GB Memoria Ram	ASUS
Excel16	Microsoft Office	Microsoft Company
Workbench	Transient Thermal Transient Mechanical	ANSYS 14.5

El PCB y los termopares son utilizados para la obtención del perfil de calentamiento del horno de reflujo y son proporcionados por la empresa Yazaki Mexico (R & D Technical Center), mientras la computadora es utilizada para las simulaciones (computadora personal). El excel es utilizado para la obtención de las temperaturas en la superficie del PCB y el ANSYS es utilizado para la simulación en 3D de la transferencia de calor en el PCB durante el proceso de reflujo. El software de simulación fue proporcionado por la facultad de ingeniería mecánica y eléctrica (FIME).

5.2 PROPIEDADES DEL PCB

Para la simulación de la transferencia de calor en el PCB es necesario conocer sus características, ya que para poder realizarla es necesario proporcionar al programa las propiedades de la tarjeta. Para esto, se tomaron en cuenta las propiedades proporcionadas por el proveedor y las que obtuvo Carlos Rodríguez en su tesis doctoral [13]. En la tabla 5.2 se muestran las propiedades que el proveedor otorga en la ficha técnica del material.

Tabla 5.2: Tabla de propiedades del PCB proporcionada por el proveedor.

Elemento de prueba	Valor	Unidades
Temperatura de transición vitrea (T_g)	175	°C
Coefficiente de expansión térmica (eje z)	Antes de T_g 46 Después de T_g 267	Ppm/°C
Coefficiente de expansión térmica (eje z) (50-260)	2.8	%
Temperatura de descomposición (T_D)	357	°C
T288	30	min
Resistencia a la flexión	Warp 589 Fill 456	N/mm^2

Debido a que las propiedades proporcionadas por el proveedor resultan ser insuficientes, ya que el software de simulación requiere una cantidad más extensa y precisa, se toman en cuenta las propiedades estudiadas en la tesis de Carlos Rodríguez, trabajo que se dedica completamente al estudio y caracterización de los materiales que constituyen a los PCBs. La tabla 5.3 muestra las propiedades mostradas en dicho trabajo.

Tabla 5.3: Tabla de propiedades para la simulación.

Propiedad	Valor	Unidades	Referencia
Módulo de elasticidad en x	5,817,500	N/m^2	Experimental
Coefficiente de Poisson en xy	0.136	N/D	Internet
Densidad de masa	1,790	kg/m^3	Handbook
Límite de tensión en x	310,000,000	N/m^2	Internet
Límite de compresión en x	415,000,000	N/m^2	Internet
Límite elástico	251,705,000	N/m^2	Experimental
Coefficiente de expansión térmica en x	Abajo de $T_g = 20 \times 10^{-6}$ Encima de $T_g = 70 \times 10^{-6}$	Ppm/K	Handbook
Conductividad térmica	X=0.488 Y=0.488 Z=0.299	$W/m \cdot K$	Handbook
Calor específico	950	$J/kg \cdot K$	Internet

Por otra parte, es necesario conocer las condiciones en el horno de reflujo para poder obtener una simulación precisa del comportamiento del PCB durante el proceso de reflujo.

5.3 ESTUDIO DEL PERFIL DE CALENTAMIENTO DEL HORNO DE REFLUJO

Para obtener el coeficiente de convección térmica es necesario conocer el perfil de calentamiento del horno de reflujo (en la figura 5.2 se muestra el horno en el que se realizaron las pruebas), por lo que se optó por añadir termopares a un PCB, hacer una corrida a través de las ocho zonas del horno a las condiciones que normalmente se realiza el proceso de soldadura, y que los termopares tomen los datos de temperatura en cada zona.



Figura 5.2: Horno de reflujo de pruebas.

En la figura 5.3 se observa la tarjeta con los termopares adheridos, los cuales se encuentran a 1cm de altura con el fin de obtener la temperatura del aire y así poder obtener el coeficiente de transferencia de calor del horno.

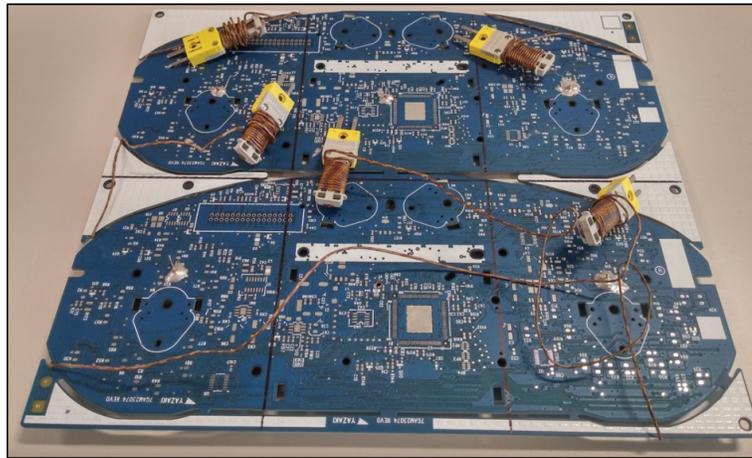


Figura 5.3: PCB con termopares.

El método consiste en dividir el PCB en cinco secciones, como se observa en la figura 5.4, en cada sección es colocado un termopar, con el fin de cubrir toda la superficie de la tarjeta y determinar si la convección es uniforme en toda la superficie de la tarjeta. Debido a las características del equipo de medición, solo es posible colocar cinco termopares.

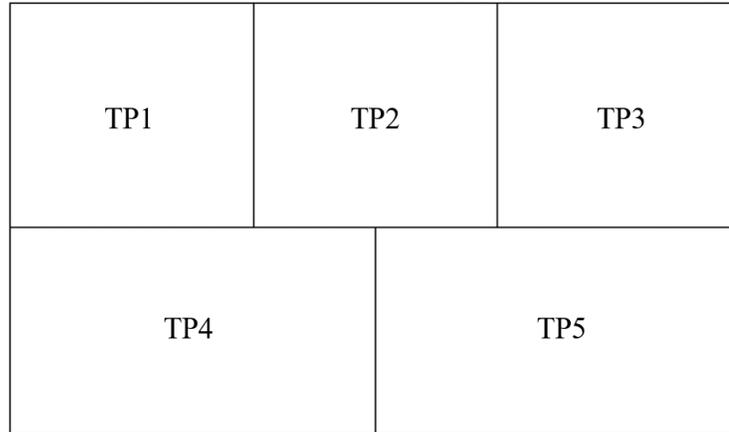


Figura 5.4: Esquema de las secciones del PCB.

Posteriormente, los datos obtenidos del perfil de calentamiento del horno son aplicados en la ley del enfriamiento de Newton [1] [12] [2], la cuál se muestra en la ecuación 5.1, con valores de conducción térmica positivos con los que podremos obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección sobre el PCB.

$$h = \frac{k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)}{(T_s - T_\infty)} \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (5.1)$$

Dónde:

- h : es el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire al PCB.
- k : es la conductividad térmica del aire.
- $\frac{\partial T}{\partial y}$: es el gradiente de temperatura con respecto a la altura entre la superficie del PCB y los calentadores del horno.
- T_s : es la temperatura en la superficie del PCB.
- T_∞ : es la temperatura en el horno.

Con los resultados obtenidos, posteriormente podremos aplicar un análisis numérico con el fin de encontrar el coeficiente de transferencia de calor por convección en estado transitorio sobre cada punto en la superficie del PCB, además el

efecto del calentamiento del horno de reflujo sobre la superficie y las consecuencias que provoca en las propiedades térmicas de los materiales que componen a la tarjeta.

5.4 TÉCNICAS DE SIMULACIÓN

5.4.1 ANÁLISIS NÚMÉRICO POR DIFERENCIAS FINITAS

Para un estudio más preciso, se aplicaron técnicas de análisis numéricos por diferencias finitas para transferencia de calor por convección en estado transitorio con un método Gauss-Siedel con ecuación de iteración [2] [12], con el cuál podemos obtener la distribución de temperatura sobre la superficie de la tarjeta y poder comprobar que la transferencia de calor por convección es uniforme en cada punto de ésta. El método consiste en crear una hoja de excel en la que se representa la superficie del PCB en la que se aplicaran las fórmulas correspondientes a cada caso de transferencia de calor. Se aplica una aproximación de las dimensiones del PCB, en la que cada celda se representa como un nodo de 1cm. La figura 5.5 representa la distribución de cada nodo sobre la tabla de excel.

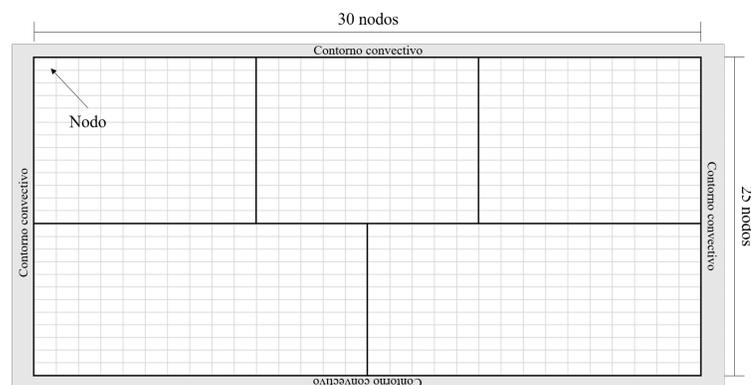


Figura 5.5: Representación de la superficie del PCB en una hoja de excel.

Posteriormente, se procede en la aplicación de las fórmulas para cada caso de transferencia de calor por convección en estado transitorio por análisis de diferencias

finitas. En la figura 5.6, se muestran las fórmulas para un «nodo interno», «nodo con contorno convectivo» y «esquina exterior con contorno convectivo»:

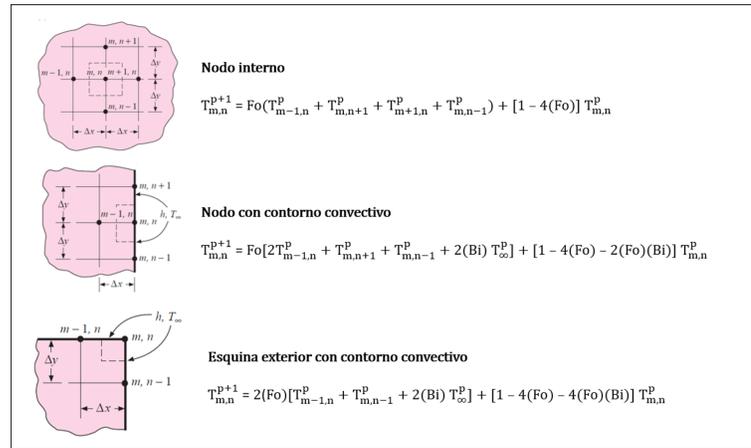


Figura 5.6: Ecuaciones explícitas para el análisis numérico por diferencias finitas de la temperatura de la superficie del PCB [2] [12].

dónde:

- $T_{m,n}^{p+1}$: es la temperatura en el nodo central del estado presente.
- Fo : es el módulo de Fourier.
- $T_{m-1,n}^p$: es la temperatura del nodo hacia el nodo central en el estado anterior.
- $T_{m,n+1}^p$: es la temperatura del nodo hacia arriba del nodo central en el estado anterior.
- $T_{m+1,n}^p$: es la temperatura del nodo hacia la izquierda del nodo central en el estado anterior.
- $T_{m,n-1}^p$: es la temperatura del nodo hacia abajo del nodo central en el estado anterior.
- $T_{m,n}^p$: es la temperatura del nodo central en el estado anterior.
- Bi : es el número de Biot.

El módulo de Fourier (Fo) (ecuación 5.2) es un número adimensional que describe la relación entre la velocidad de conducción térmica y la velocidad de almacenamiento de energía.

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} \quad (5.2)$$

Dónde:

- α : es la difusividad del PCB.
- Δt : es el tiempo que transcurre entre los estados.
- Δy : es la relación entre la cantidad de nodos y la longitud del PCB en x y y .

La difusividad se obtiene de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (5.3)$$

dónde:

- k : es la conductividad del PCB.
- ρ : es la densidad del PCB.
- C_p : es el calor específico del PCB.

El número de Biot (Bi) (ecuación 5.4) es un número adimensional que relaciona la transferencia de calor por conducción de un cuerpo y la transferencia de calor por convección del mismo cuerpo.

$$Bi = \frac{h \Delta y}{k} \quad (5.4)$$

- h : es la transferencia de calor por convección del aire hacia el PCB.
- Δy : es la relación entre la cantidad de nodos y la longitud del PCB en x y y .
- k : es la conductividad térmica del aire sobre el PCB.

El módulo de Fourier cuenta con una restricción para cada caso; para un nodo interno el módulo debe tener valores de $Fo \leq \frac{1}{4}$, para un nodo con contorno convectivo los valores deben de ser $Fo(2 + Bi) \leq \frac{1}{2}$, y para una esquina exterior con contorno convectivo la restricción debe ser de $Fo(1 + Bi) \leq \frac{1}{4}$.

Estas fórmulas son aplicadas en la hoja de excel para proporcionar los datos en el análisis numérico. La forma de obtención de la distribución de temperatura consiste en crear una tabla con los datos y con las temperaturas de cada nodo del primer estado (figura 5.7), posteriormente se crea una tabla del siguiente estado a un Δ_t de 15 segundos y se toman los datos para un nodo interno, un nodo con contorno convectivo y esquina exterior con contorno convectivo como se muestra en la figura 5.9.

		TP1	TP2	TP3	TP4	TP5
Temperatura de salida del horno	ΔT (segundos)					
	Temperatura Salida (°C)					
Temperatura en la superficie del PCB	Temperatura Superficie (°C)					
Gradiente de temperatura	ΔT/Δy					
	Δy (m)					
Relación entre la cantidad de nodos y la longitud del PCB	k (W/m·K)					
	h (W/m²·K)					
Conductividad térmica del aire	Bi					
Módulo de Fourier	Fo					

Figura 5.7: Tabla de datos del modelo.

Para lograr que excel aplique las aproximaciones de temperatura, es necesario especificarle al programa que realice «cálculos iterativos». Para esto, es necesario entrar a las opciones del programa y habilitar la opción de cálculo iterativo, que en éste caso se le pedirá que realice un máximo de 1000 iteraciones, como se muestra en la figura .

Con los resultados obtenidos del análisis por diferencias finitas, obtendremos la distribución de temperatura sobre la superficie del PCB con lo cuál podremos saber si la distribución de temperatura sobre su superficie es homogénea, de tal

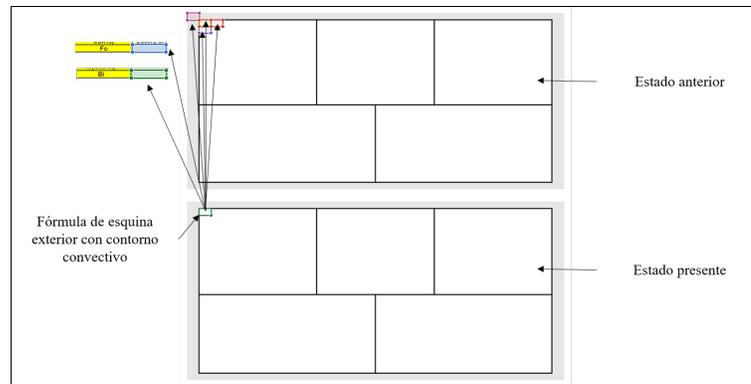


Figura 5.8: Explicación de los datos se que toman para un nodo en esquina exterior con contorno convectivo.

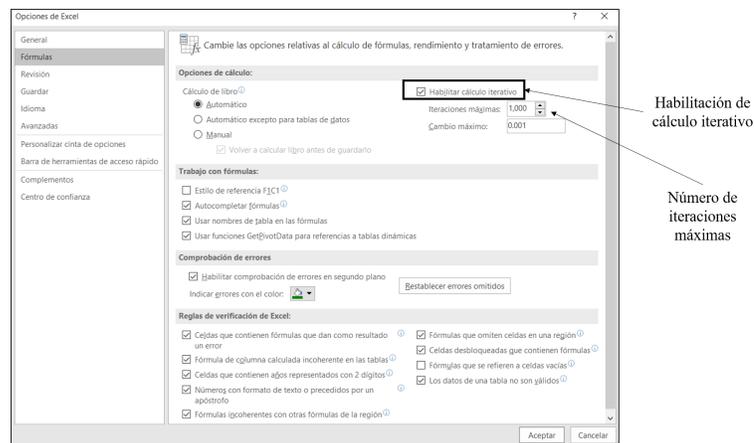


Figura 5.9: Modificaciones de las opciones de excel para realizar cálculos iterativos.

manera, que al realizar la simulación en 3D mediante análisis de elementos finitos, el coeficiente de convección térmica sea lo más aproximado posible a la realidad.

5.4.2 SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Para la evaluación del comportamiento termo-mecánico del PCB, se optó por un análisis de elementos finitos, debido que es la técnica más utilizada en el estado del arte para la simulación del comportamiento del PCB durante el proceso de reflujo, ya que en el se pueden aplicar las propiedades obtenidas y estudiadas del PCB, así como

las condiciones del horno medidas experimentalmente. El software utilizado para el análisis son los módulos térmico y mecánico en estado transitorio del Workbench (ANSYS versión 14.5).

El proceso consta en primera instancia en exportar el modelo del PCB proporcionado por la empresa Yazaki (figura 5.10), y posteriormente en el programa, se agregan a la geometría los módulos térmico transitorio y mecánico transitorio. Posteriormente se agregan el material y las propiedades, mostradas en las tablas 5.2 y 5.3, que son requeridas para la simulación. En la figura 5.11 se observan los pasos mencionados anteriormente.

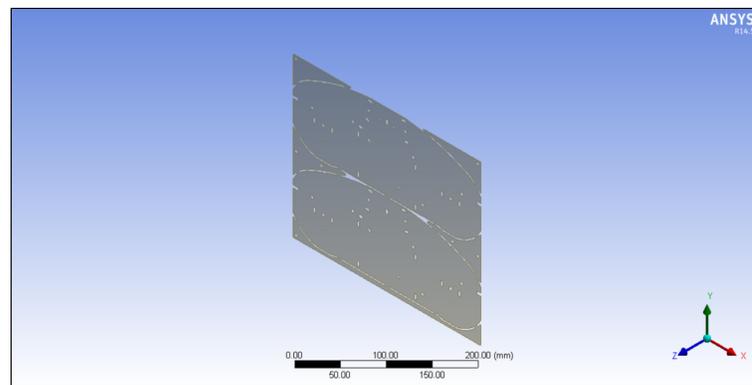


Figura 5.10: Modelo importado del PCB.

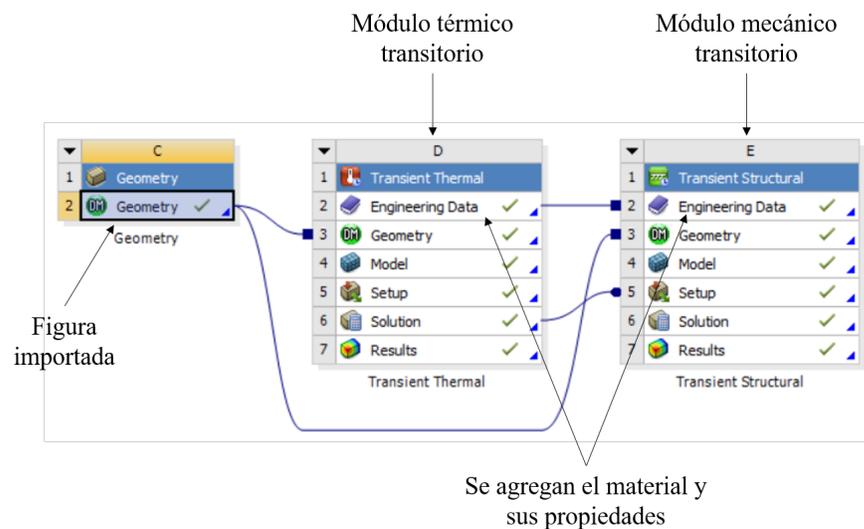


Figura 5.11: Proceso para simulación.

Antes de pasar a la simulación del PCB, se realizó el mallado del modelo con un centro de relevancia y una curvatura de ángulo finos, agregando un dimensionamiento al cuerpo de la geometría con un tamaño de elemento de $1 \times 10^{-2} \text{m}$ y un refinamiento a las caras del PCB. La figura 5.12 señala las especificaciones del mallado.

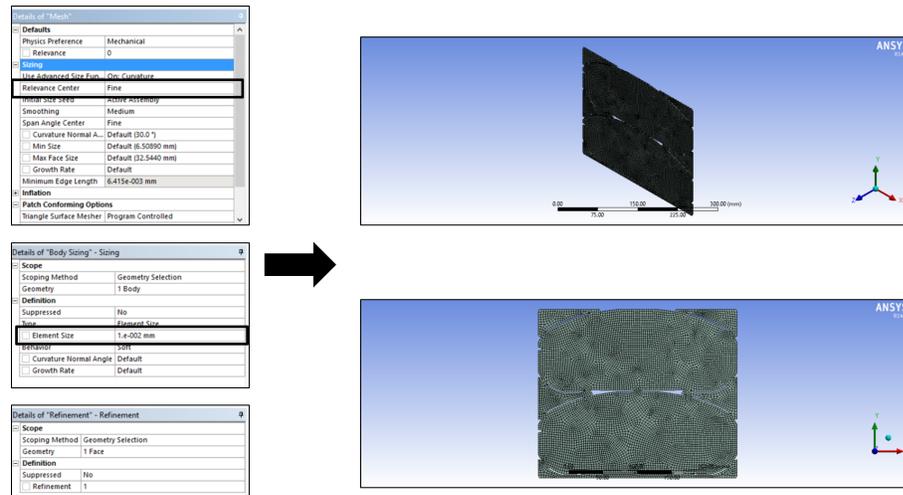


Figura 5.12: Proceso mallado para la simulación.

Algo que se debe señalar, es que debido a la capacidad de la computadora en la que se realizó la simulación, se tuvo que optar por simular una tarjeta con un espesor de 1 mm, por lo que los resultados se pueden ver afectados, debido a que el espesor real de la tarjeta es de 1.6 mm. Ésto no significa que la simulación no represente cualitativamente los resultados del proceso.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se reportan y discuten los resultados encontrados de las condiciones del horno de reflujo, del cálculo de la temperatura en la superficie de la tarjeta mediante análisis numérico por diferencias finitas y la simulación termo-mecánica del PCB. Igualmente, se presentan las coincidencias y diferencias observadas en los resultados obtenidos con respecto a los publicados en otros trabajos de investigación.

6.1 CONDICIONES DEL HORNO DE REFLUJO

Para el estudio del perfil de temperatura del horno de reflujo se realizaron cinco pruebas, mostradas en las figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5. En las gráficas se puede observar que el calentamiento sobre la superficie de la tarjeta no es uniforme durante el tiempo que transcurre en el horno, también se observa una discrepancia en la figura 6.3 con respecto a las cuatro pruebas restantes, donde se muestra un desfase de uno de los termopares, lo que resulta descartable. Los resultados obtenidos concuerdan con las investigaciones de Balázs Illés [9][24][25] y David C. Whalley [30], en cuyos trabajos se muestra un perfil de calentamiento no homogéneo a través de las zonas del horno de reflujo. Además, los perfiles obtenidos concuerdan con los resultados conseguidos en las mediciones de registro interno realizadas por la empresa Yazaki.

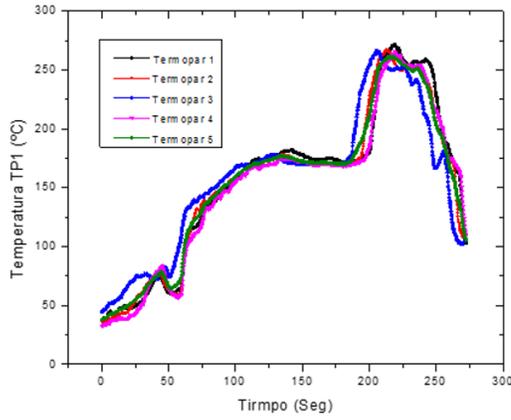


Figura 6.1: TP 1 temperatura vs tiempo.

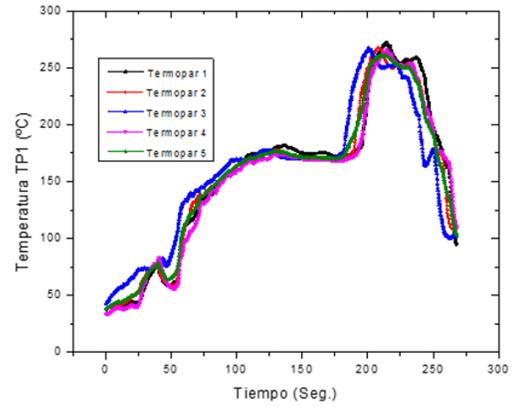


Figura 6.2: TP 2 temperatura vs tiempo

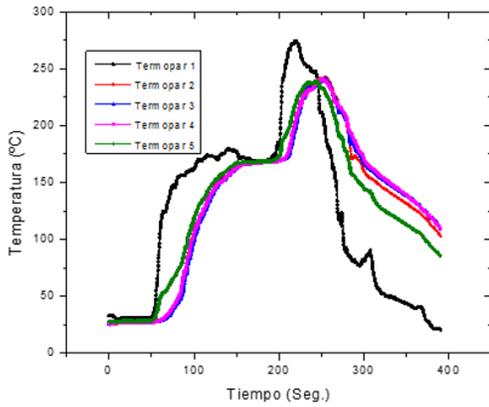


Figura 6.3: TP 3 temperatura vs tiempo

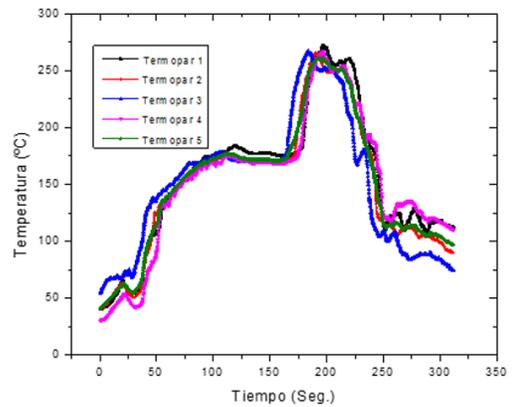


Figura 6.4: TP 4 temperatura vs tiempo

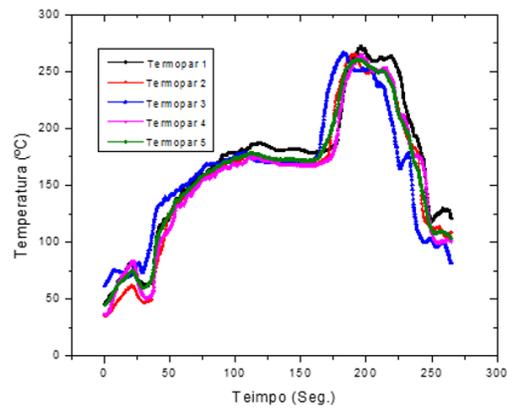


Figura 6.5: TP 5 temperatura vs tiempo

6.2 TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DEL PCB

El análisis numérico por diferencias finitas en estado transitorio realizado en tabla de excel es expuesto en la figura 6.6, mostrando el calentamiento cada 60 segundos durante los 270 segundos que pasa la tarjeta en el horno. Los resultados arrojan un calentamiento homogéneo de la superficie del PCB a través del tiempo. David C. Whalley [30] obtuvo diferentes resultados en su trabajo, debido a que el método de análisis de diferencias finitas utilizado en éste trabajo de investigación es el que se explica en el libro de J.P. Holman [2] y el de Theodore L. Bergman [12].

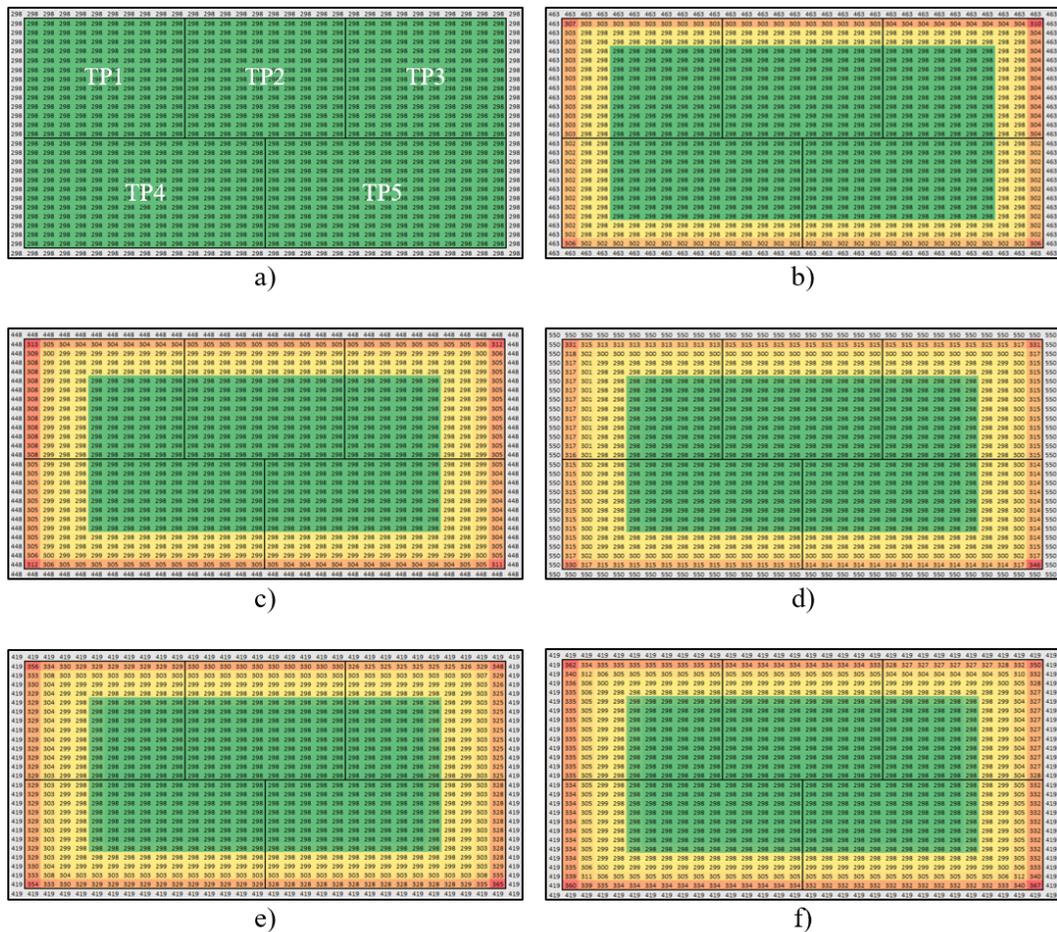


Figura 6.6: Análisis de calentamiento a través del tiempo con Δt de a)0 seg. b)60 seg. c)120 seg. d)180 seg. e)240 seg. f)270 seg.

Los resultados completos se pueden observar en el apéndice A, en las figuras A.1 y A.2, en las que se representa el proceso de la tarjeta a través del horno por un tiempo de 270 segundos con un Δt de 15 segundos.

6.3 SIMULACIÓN TERMO-MECÁNICA DEL PCB

Los coeficientes de convección térmica utilizados para la simulación son los mostrados en la tabla 6.1, valores que fueron estimados para obtener el calentamiento de la tarjeta. Posteriormente, se aplicaron las cargas térmicas al modelo proporcionado por Yazaki en el módulo térmico transitorio del ANSYS. Las cargas térmicas se hicieron en las dos caras de la tarjeta, como se muestra en la figura 6.7.

Tabla 6.1: Coeficientes de convección térmica.

Coefficiente de	5
convección	$6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
térmica	7

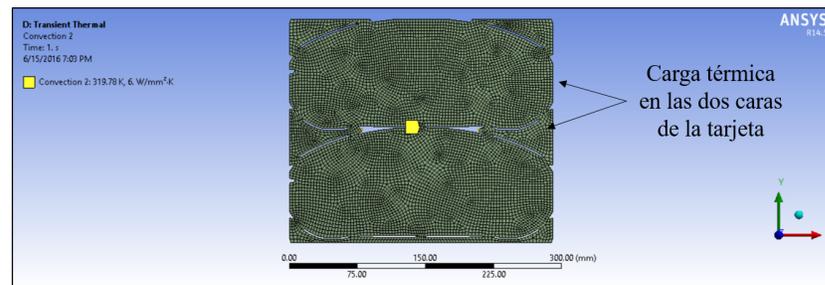


Figura 6.7: Cargas de convección en el modelo del PCB.

Esta distribución de temperatura se asemeja a los resultados obtenidos del perfil de calentamiento del horno de reflujo medidos experimentalmente, por lo que se puede afirmar que el coeficiente de transferencia de calor por convección es $\approx 6 W/m^2 \cdot K$. El perfil de calentamiento obtenido en la simulación contra el perfil de calentamiento obtenido experimentalmente se muestran en la tabla 6.2. El gráfico del resultado de la simulación se muestra en la figura 6.8.

Tabla 6.2: Comparación de las temperaturas obtenidas durante el proceso.

Perfil de calentamiento ($^{\circ}K$)	Simulación térmica ($^{\circ}K$)
310.49	310.49
319.78	319.78
325.48	325.45
346.17	346.17
342.95	342.95
399.62	399.61
420.95	420.95
436.9	436.9
446.95	446.95
453.12	453.12
450.9	450.9
447.4	447.4
445.2	445.2
448.4	448.4
529.95	529.93
532.06	532.06
530.34	530.34
470.28	470.29
396.45	396.46

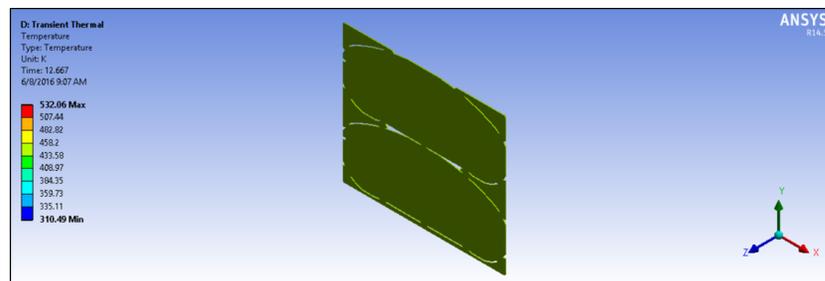


Figura 6.8: Resultado de la simulación térmica.

Para la simulación mecánica se importaron los resultados de la simulación térmica al módulo mecánico transitorio para que el programa tome en cuenta las cargas térmicas. Posteriormente se fijaron los nodos de la parte superior e inferior que simularan los rieles del horno que permitieran que la tajeta se desplazara en el eje «x» (figura 6.9). Los resultados de la simulación mecánica son mostrados en la tabla 6.3. Las deformaciones obtenidas están en función de 1 segundo, que representa los 270 segundos del proceso de reflujo del PCB a través del horno.

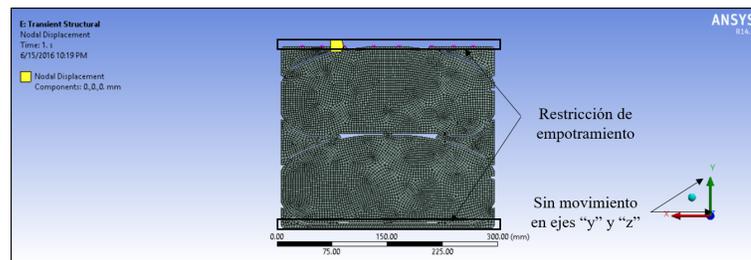


Figura 6.9: Restricción de empotramiento en nodos.

Tabla 6.3: Deformación del PCB a través del tiempo.

Tiempo (seg.)	Máxima deformación (m)
0.125	0.0059353
0.25	0.011977
0.375	0.014786
0.5	0.012672
0.625	0.012646
0.75	0.012595
0.875	0.013661
1	0.013059

Haciendo una comparación con los resultados obtenidos por S. Chung [11] [37], se observa una diferencia en la deformación obtenida, ésto puede deberse al método utilizado en el trabajo de investigación, ya que realizan un modelo de los rieles del horno, además agregan un perfil de temperatura lineal. Los gráficos obtenidos se muestran en la figura 6.10, en los que se observa una deformación tipo «bow».

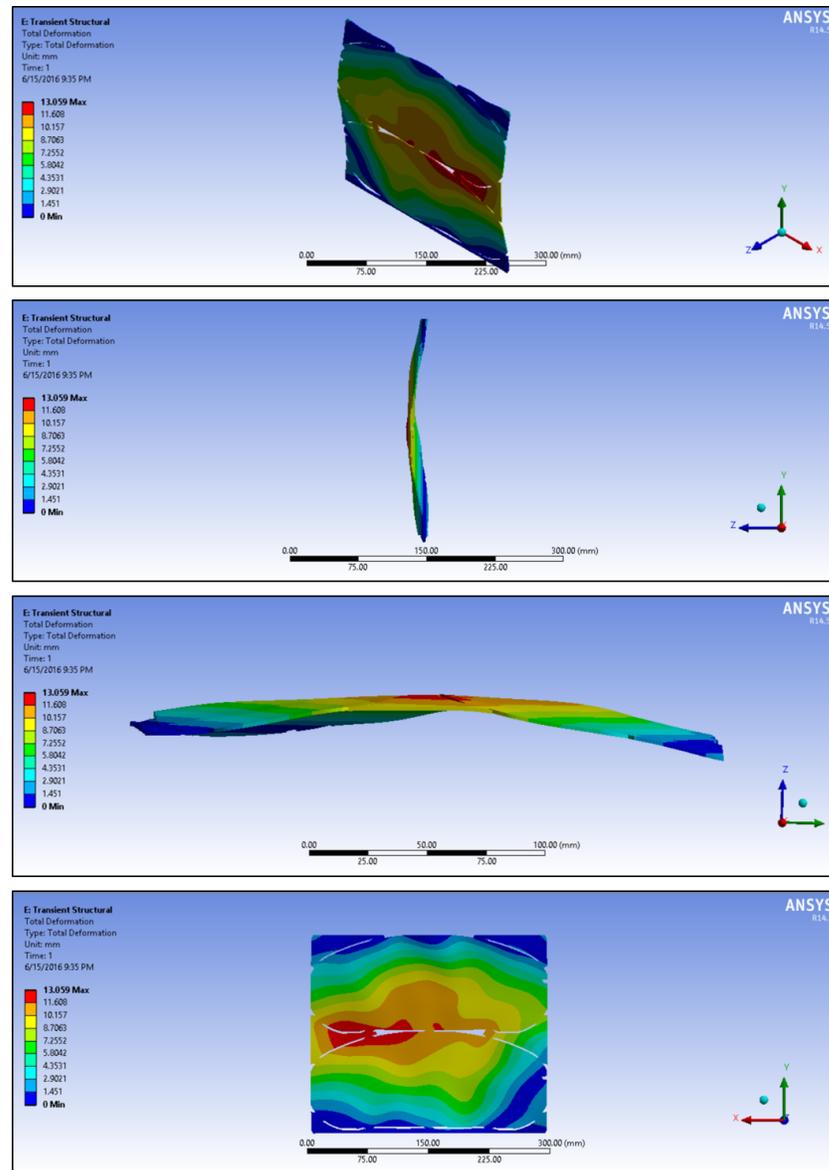


Figura 6.10: Gráfico del PCB en diferentes ángulos.

Por otra parte, los resultados experimentales obtenidos por C. Rodríguez en su tesis doctoral muestran una deformación máxima de 0.003m (figura 6.11), la razón podría ser que en ésta investigación no se abarca la zona de enfriamiento y el segundo reflujo en dónde el PCB sufre deformaciones posteriores. Otra razón puede ser el espesor utilizado en la tarjeta, ya que para esta investigación se realizan las cargas térmicas y mecánicas a una tarjeta de 0.001m y el espesor real de la tarjeta es de 0.0016m, como se menciona en el capítulo 5.

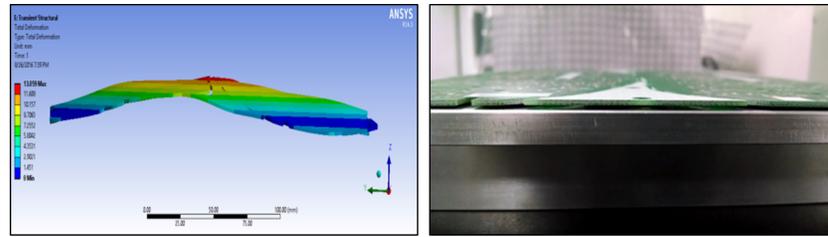


Figura 6.11: Comparación de resultados de simulación con resultados experimentales obtenidos por Carlos Rodríguez [13].

Los resultados de la simulación con cargas térmicas de 5 y $7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ se muestran en el apéndice B en las figuras B.1, B.2 y B.3.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1 CONCLUSIONES

- Los datos obtenidos del perfil de temperatura muestran un calentamiento irregular y un calentamiento no homogéneo en la superficie de la tarjeta de circuito impreso. Con esto, se concluye que la distribución de temperaturas, por ende el coeficiente de transferencia de calor por convección, sobre la superficie del PCB no representa un factor determinante en su deformación.
- El análisis numérico por diferencias finitas expone un calentamiento de la tarjeta desde sus costados hacia el centro, lo que no puede ser posible ya que el horno envía el aire caliente hacia las caras del PCB. Ésto es debido a que en el modelo, las ecuaciones para nodos internos integran los efectos de la convección. Por conclusión, éste método tendría que ser modificado para poder utilizarlo en el tipo de problema expuesto en el trabajo de investigación.
- La simulación termo-mecánica en estado transitorio mediante análisis de elementos finitos, exhibe diferentes resultados a los obtenidos experimentalmente por, ésto puede ser debido a que en el modelo no se incluyen las zonas de enfriamiento ni el segundo reflujo, en dónde el PCB también exhibe deformaciones. A pesar de esto, se concluye que mediante éste método es posible crear

un modelo realista que eventualmente ayude con la predicción de la deformación de las tarjetas de circuito impreso.

7.2 TRABAJO FUTURO

Hoy en día, la simulación por análisis de elementos finitos es una herramienta indispensable para el estudio de ciencia de materiales. Su aplicación permite obtener nuevo conocimiento que complementa el obtenido experimentalmente. A continuación se presentan algunas recomendaciones que ayuden a mejorar la investigación y continuar con ésta línea de investigación:

- Perfeccionar el modelo, de manera que se obtengan resultados similares a los obtenidos experimentalmente.
- Realizar mediciones de precisión de las dimensiones del PCB antes y después de la distorsión, mediante métodos como: digitalización 3D o con el método «Shadow Moiré».
- Añadir al modelo de simulación la zona de enfriamiento y el segundo reflujo, para hacerlo más realista.
- Añadir al modelo del PCB los componentes que son montados durante el proceso de reflujo, para que el modelo tenga más similitud con la realidad.

APÉNDICE A

APÉNDICE A: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN POR MDF

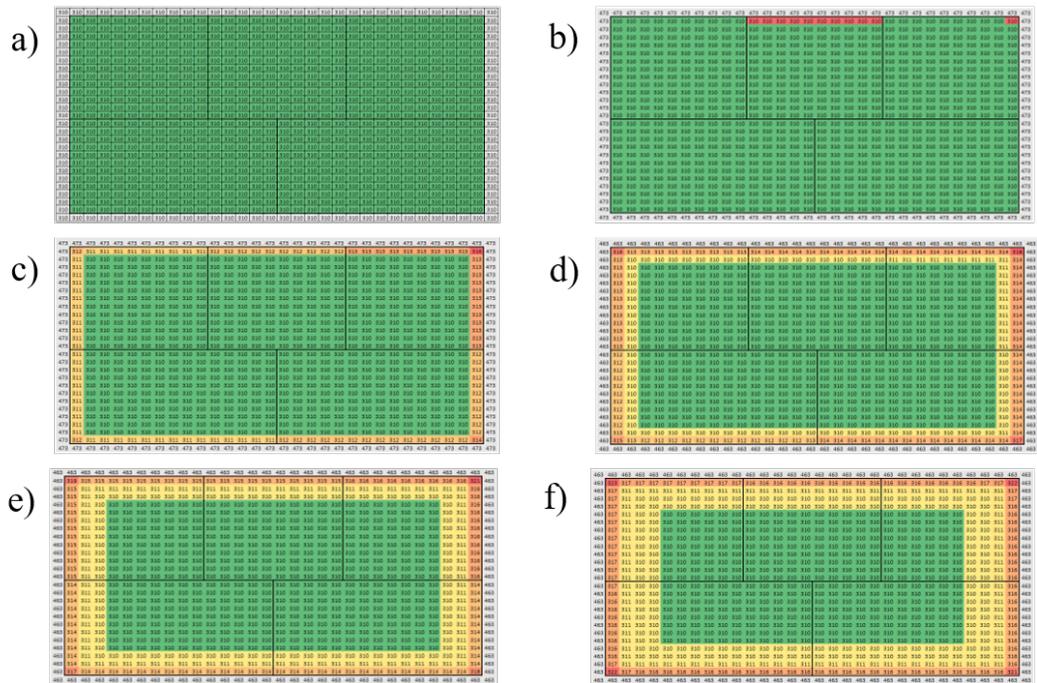


Figura A.1: Análisis de calentamiento a través del tiempo con Δt de a)0 seg. b)15 seg. c)30 seg. d)45 seg. e)60 seg. f)75 seg.

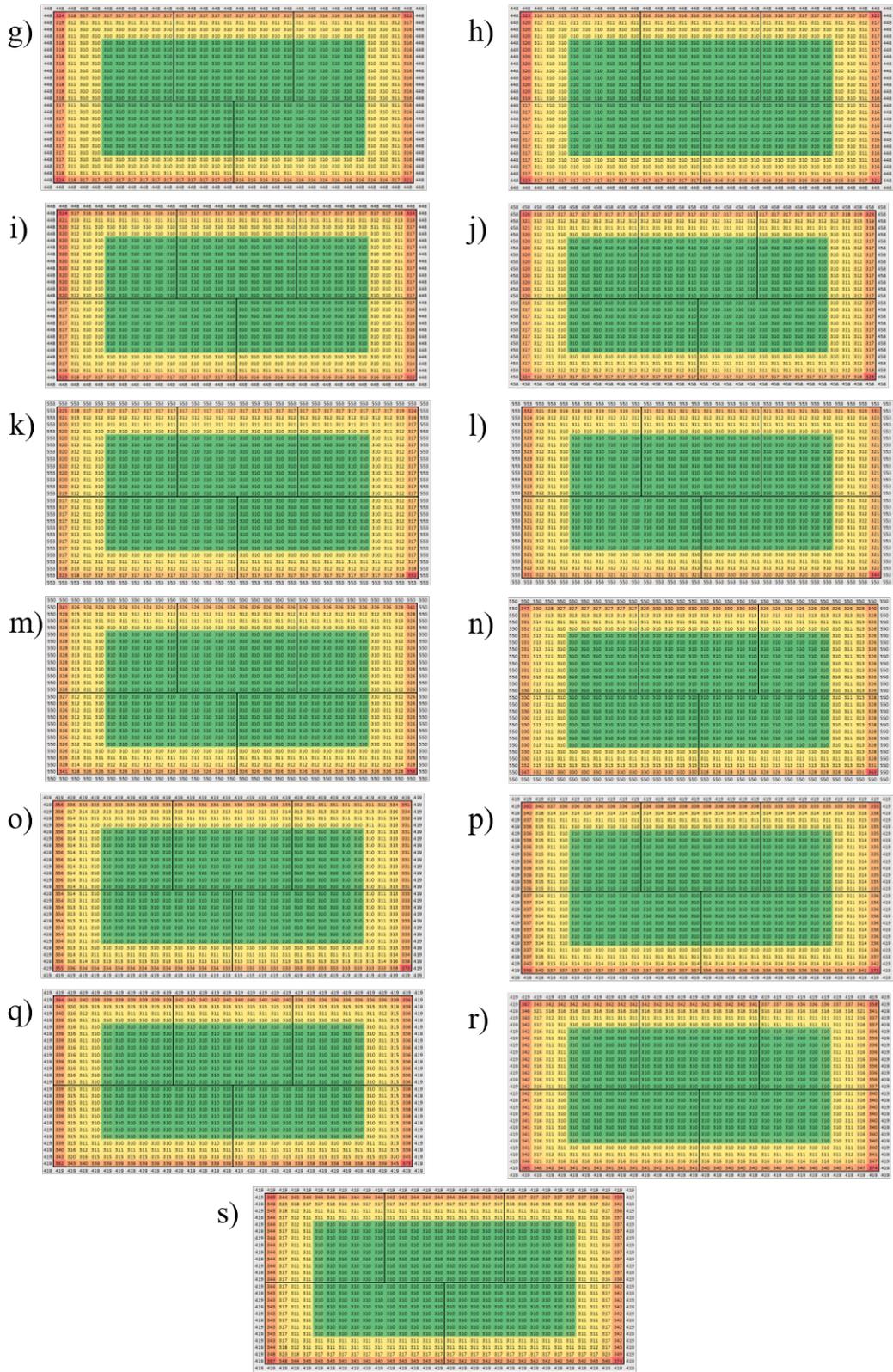


Figura A.2: (Continuación) Análisis de calentamiento a través del tiempo con Δt de g)90 seg. h)105 seg. i)120 seg. j)135 seg. k)150 seg. l)165 seg. m)180 seg. n)195 seg. o)210 seg. p)225 seg. q)240 seg. r)255 seg. s)270 seg.

APÉNDICE B

APÉNDICE B: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN POR MEF

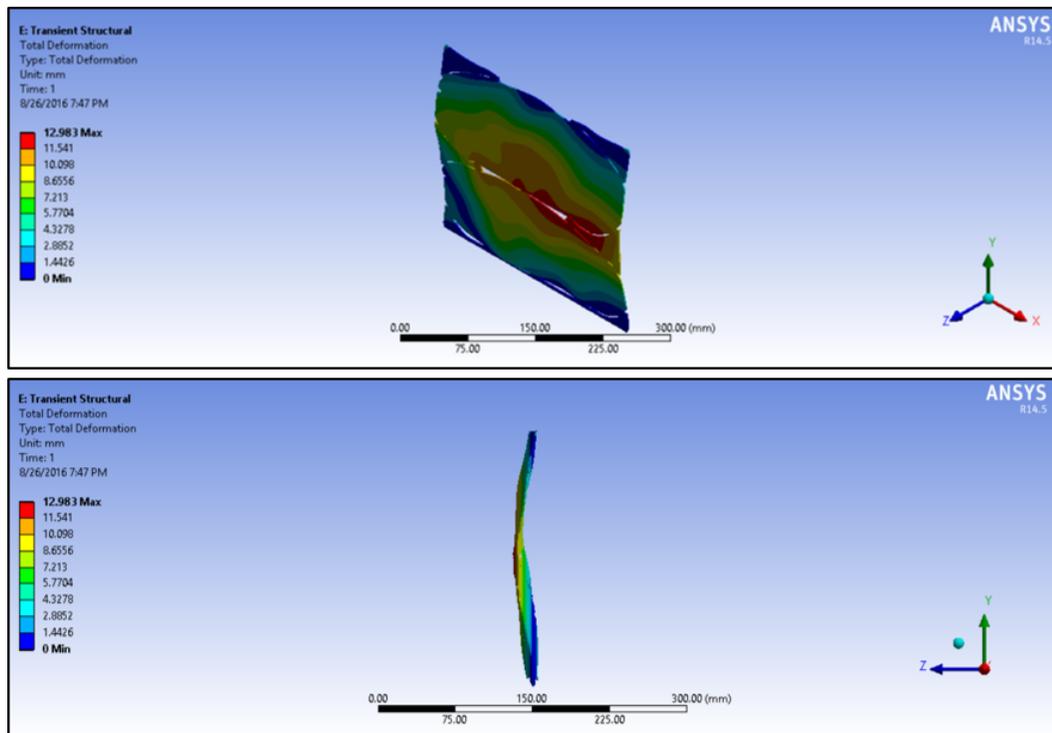


Figura B.1: Resultados de la simulación termo-mecánica con una carga térmica de $5W/m^2 \cdot K$

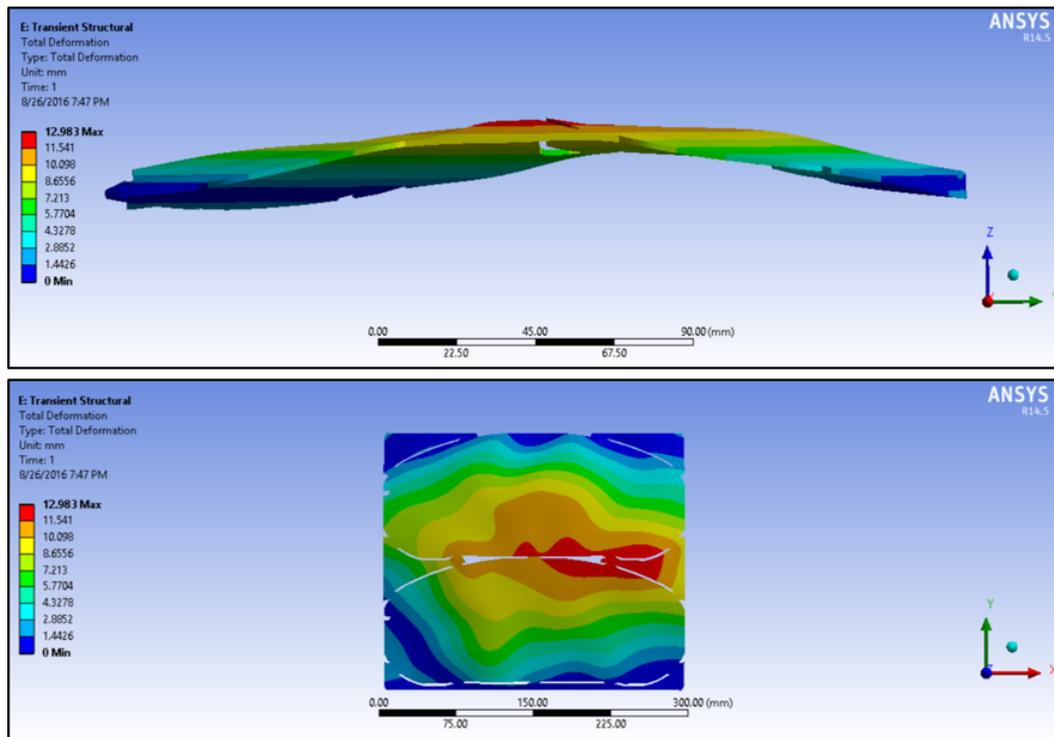


Figura B.2: (Continuación) Resultados de la simulación termo-mecánica con una carga térmica de $5W/m^2 \cdot K$

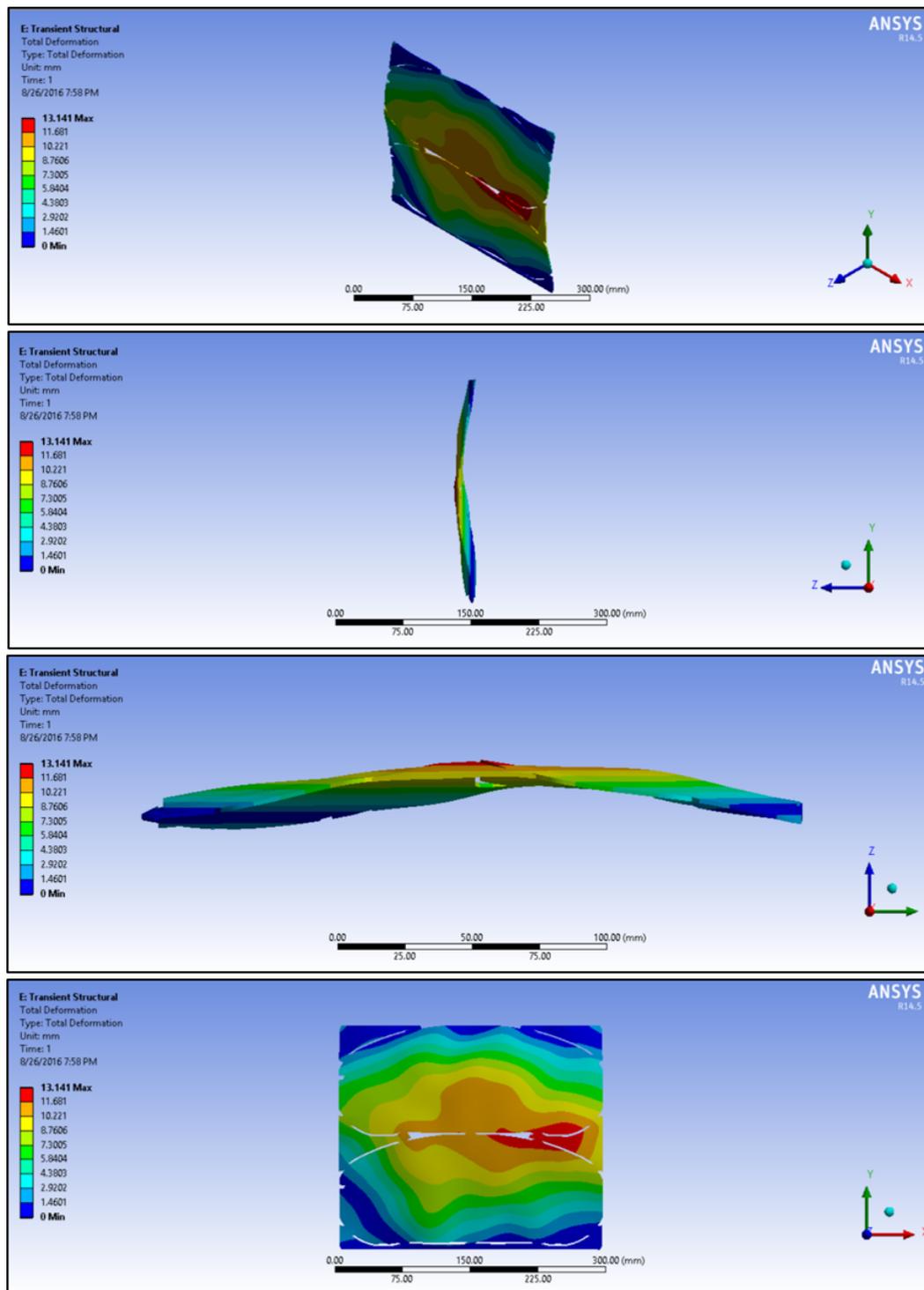


Figura B.3: Resultados de la simulación termo-mecánica con una carga térmica de $7W/m^2 \cdot K$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.J. Ghajar Y.A. Çengel. *Heat and Mass Transfer Fundamentals and Applications*. McGraw Hill, 5 edition, 2015.
- [2] J.P. Holman. *Heat Transfer*. McGraw Hill, 2010.
- [3] A.H. Shah Y.M. Desai, T.I. Eldho. *Finite Element Method with Applications in Engineering*. Pearson, 1 edition, 2011.
- [4] R. Sanapala. *Characterization of FR-4 Printed Circuit Board Laminates Before and After Exposure to Lead-Free Soldering Conditions*. PhD thesis, University of Maryland, College Park, Maryland, 2008.
- [5] Jasbir Bath. *Lead-Free Soldering*. Springer Science+Business Media, 2007.
- [6] IPC, Illinois. *2.4.222c Bow and Twist (%), IPC-TM-650 Test Methods Manual*, 1999.
- [7] J. Clyde and F. Coombs. *Printed Circuits Handbook*. McGraw Hill, 6 edition, 2008.
- [8] K. Miyazaki W. Zhou M. Yamane, N. Orita. Development of new model reflow oven for lead-free soldering. *Furukawa Review*, (26):31–36, 2004.
- [9] G. Harsányi Z. Illyefavi-Vitéz A. Szabó B. Illés, O. Kramer. 3d investigations of the internal convection coefficient and homogeneity in reflow ovens. In *Electronics Technology, 30th International Spring Seminar On*, Cluj-Napoca, 2007.

-
- [10] Y.H. Lin C.Y. Juang-M.Y. Tsai T.C. Huang M.C. Liao, P.S. Huang. Warpage measurements of printed circuit board during reflow process using strain gauges. In *Microsystems Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2014 9th International*, Taipei, 2014.
- [11] J.B. Kwak S. Chung. Realistic warpage evaluation of printed board assembly during reflow process. *Soldering and Surface Mount Technology*, 27(4):137–145, 2015.
- [12] F.P. Incropera D.P. Dewitt T.L. Bergman, A.S. Lavine. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons, Inc., 7 edition, 2011.
- [13] Carlos Rodríguez. *Thermal Properties and Thermomechanical Performance for Composite Materials for Printed Circuit Boards (In Process)*. PhD thesis, Universidad Autónoma De Nuevo León, 2016.
- [14] Universidad Central. ¿que es modelado y simulación?
- [15] T. Otsuru T. Sakuma, S. Sakamoto. *Computational Simulation in Architectural and Enviromental Acoustics. Methods and Applications of Wave-Based Computation*. Springer, 1 edition, 2014.
- [16] T.F. Chan J. Demmel-J.M. Donato J. Dongarra V. Eijkhout R. Pozo C. Romine H. Van der Vorst R. Barret, M. Berry. *Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods*. SIAM, 2 edition, 1994.
- [17] Joseph LaDou. Printed circuit board industry. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209(3):211–219, 2006.
- [18] J.K. Spelt B. Djurovic, C.A. Puzzo. Analysis of thermal warpage in a pcb with an array of pth connectors. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 2(3):414–420, 1999.
- [19] The Euopean Parliament and the Council of the European Union, Official Journal of the European Union. *Directive 2002/95/EC on the restriction of the use*

- of certain hazardous substances (RoHS) in electrical and electronic equipment*, 2003.
- [20] The European Parliament and the Council of the European Union, Official Journal of the European Union. *Directive 2002/95/EC on the waste electrical and electronic equipment (WEEE)*, 2003.
- [21] S. Ganesan and M. Pecht. *Lead-free Electronics*. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, USA, 2006.
- [22] Y.T. Chiou T. Chen-C.C. Hsieh J.J. Yan W.Z. Chen Y.D. Wu C.H. Chien, Y.C. Chen. Influences of the moisture absorption on pbga package's warpage during ir reflow process. *Microelectronics Reliability*, 43(1):131–139, 2003.
- [23] J.Y. Lee S. Cho. Heat dissipation of printed circuit board by the high thermal conductivity of photo-imageable solder resist. *Electronic Materials Letters*, 6(4):167–172, 2010.
- [24] G. Harsányi Z. Illyefavi-Vitéz B. Illés, O. Kramer. Modelling heat transfer efficiency in forced convection reflow ovens. In *International Spring Seminar on Electronics Technology*, St. Marienthal, 2006.
- [25] B. Illés. Measuring heat transfer coefficient in convection reflow ovens. *Messurement*, 43(9):1134–1141, 2010.
- [26] P.P. Conway D.J. Williams D.C. Whalley, A.O. Ogunjimi. A process model of the infra-red reflow soldering of printed circuit board assemblies. In *Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1991. Eleventh IEEE/CHTM International*, San Francisco, CA, 1991.
- [27] T. Martin C. Umeagukwu-R. Fulton C.P. Yeh, K. Banerjee. Experimental and analytical investigation of thermally induced warpage for printed wiring boards. In *Electronic Components and Technology Conference, 1991. Proceedings, 41st*, Atlanta, GA, 1991.

- [28] P.P. Conway F. Sarvar. Effective transient process modelling of the reflow soldering of printed circuit assemblies. In *Thermal Phenomena in Electronics Systems, 1996. I-THERM V, Inter-Society Conference On*, Orlando, FL, 1996.
- [29] J.T. Gatro I. Charles Ume, T. Martin. Finite element analysis of pwb warpage due to the solder masking process. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part A*, 20(3):295–306, 1997.
- [30] D.C. Whalley. A simplified model of the reflow soldering process. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002. I-THERM 2002. The Eighth Intersociety Conference On*, 2002.
- [31] V.C. Venkatesh Y.L. Khong K.S. Beh, A. Ourdjini. Finite element analysis of substrate warpage during die attach process. In *Electronic Materials and Packaging, 2002. Proceedings of the 4th International Symposium on*, 2002.
- [32] D. Agonafer A.S. Halvi, W. Ahn. Simulation of pwb warpage during fabrication and due to reflow. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004. I-THERM '04. The Ninth Intersociety Conference (Volume 2)*, 2004.
- [33] K. Nakao E. Iwasaki. Development of high-speed pb-free reflow ovens. *Furukawa Review*, (27):40–46, 2005.
- [34] T. Koyanagawa M. Inoue. Thermal simulation for predicting substrate temperature during reflow soldering process. In *Electronic Components and Technology Conference, 2005. 55th*, 2005.
- [35] D.J. Kim S.K. Kim S.W. Kim, S.H. Lee. Simulation of warpage during fabrication of printed circuit boards. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 1(6):884–892, 2011.
- [36] I. Charles Ume Wei Tan. Application of lamination to study warpage across pwb and pwba during convective reflow process. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2(2):217–223, 2012.

-
- [37] T. Lee M. Park S. Chung, S. Oh. Thermo-mechanical analyses of printed board assembly during reflow process for warpage prediction. In *Thermal, Mechanical and Multy-Physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems (EuroSimE), 2014 15th International Conference On*, Ghent, 2014.
- [38] C.Y. Huang M.Y. Tsai-T.C. Huang M.C. Liao P.S. Huang, Y.H. Lin. Warpage and curvature determination of pcb with dimm socket during reflow process by strain gage measurements. In *Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2010 5th International*, Taipei, 2010.
- [39] K. Chiavone. Two surfaces are better than one. *Global SMT and Packaging*, 13(4):8–14, 2013.
- [40] J. Berger H.P. Kruckl-K. Fellner T. Krivec M. Kurz P.F. Fuchs G.A. Maier R. Shongrundner, M.J. Cordill. Adhesion of printed circuit boards with bending and the booktitle = 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multy-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, year = 2013.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Armando Esaú Leal Díaz

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
con Especialidad en Materiales

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN TARJETAS DE
CIRCUITO IMPRESO FR-4 DURANTE EL PROCESO DE REFLUJO

Armando Esaú Leal Díaz nació en Monterrey, Nuevo León, México el 20 de Marzo de 1989. Sus padres son el Sr. Armando Cesáreo Leal Contreras y la Sra. Judith Díaz González. En Diciembre de 2013 finaliza los estudios de licenciatura. En Marzo de 2015 recibió el título de Ingeniero en Materiales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En Agosto de 2014 inició sus estudios de Postgrado (becado por CONACyT) en la misma facultad.