

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



***“DESARROLLO DE UN MÉTODO DE SOLDADURA DE COMPONENTES SMT
QUE UTILIZA RADIACIÓN INFRARROJA”***

T E S I S

Que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS ÁREA MECATRÓNICA presenta:

ELENA MONSERRAT LÓPEZ MA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ROSA CITLALLI ANGUIANO COTA

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. DAVID ISAÍAS ROSAS ALMEIDA

Mexicali, B.C.

Noviembre de 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

TESIS DE GRADO

**“DESARROLLO DE UN MÉTODO DE SOLDADURA DE COMPONENTES SMT QUE UTILIZA
RADIACIÓN INFRARROJA”**
PRESENTADA POR

ELENA MONSERRAT LÓPEZ MA

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

DRA. ROSA CITLALLI ANGUIANO COTA
Directora del Comité

DR. DAVID ISAÍAS ROSAS ALMEIDA
Codirector del Comité

DRA. NOEMÍ LIZÁRRAGA OSUNA
Miembro del Comité

DR. JESÚS RIGOBERTO HERRERA GARCÍA
Miembro del Comité

DRA. MARLENE ZAMORA MACHADO
Miembro del Comité

DR. JUAN PABLO GARCÍA VÁZQUEZ
*Coordinador de Investigación y Posgrado
Facultad de Ingeniería*

Noviembre de 2025

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
DISEÑO Y SIMULACIÓN	33
PRUEBAS EXPERIMENTALES	56
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	67
TRABAJOS FUTUROS	78

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA ESPECIAL

A mi directora Rosa Citlalli, a mi co-director David, a mi colega Jorge, a mi comité, a mis hermanos Ximena y Bernardo, a mi mamá Alma, a mi pareja Alfonso, a mi gato Tito y finalmente a todos los que estuvieron involucrados en el proceso, desde Conahcyt hasta CICESE y los doctores que nos guiaron y enseñaron en el transcurso de estos años.

RESUMEN de la tesis de Elena Monserrat López Ma, presentado como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS ÁREA MECATRÓNICA.

Mexicali, Baja California, México, noviembre de 2025.

“DESARROLLO DE UN MÉTODO DE SOLDADURA DE COMPONENTES SMT QUE UTILIZA RADIACIÓN INFRARROJA”

Resumen aprobado por:

DRA. ROSA CITLALLI ANGUIANO COTA
Directora del Comité

DR. DAVID ISAÍAS ROSAS ALMEIDA
Codirector del Comité

En este trabajo de tesis se presenta una metodología teórico-experimental de un sistema de soldadura para componentes electrónicos de montaje superficial que utiliza radiación infrarroja producida por leds, la cual sigue un perfil de reflujo con ayuda de un controlador. La metodología comprende de cinco etapas centradas en el desarrollo del método del sistema de soldadura. Comenzando con el desarrollo de un arreglo óptico el cual se compone de una matriz de leds infrarrojos, una matriz de lentes colimadoras y una lente convergente, generando a la salida una mancha homogénea y con geometría cuadrada. Seguido del diseño del sistema en el programa Ansys con el objetivo de analizar el impacto de la convección forzada en las temperaturas durante el proceso en masa. Posteriormente, se desarrolla un prototipo escalado, resultado de las limitantes económicas, y se valida mediante simulaciones, apoyado de un análisis de impacto de la variación de condiciones, obteniendo una aproximación con errores de 1°C. Finalmente, se implementan diversos controladores con el objetivo del seguimiento del perfil de reflujo de referencia de la aleación SAC305 escalada. Los resultados obtenidos indican que las condiciones empleadas en el modelo del sistema simulado son similares a las condiciones del prototipo, además de conseguir un seguimiento minucioso del perfil de reflujo, con errores menores a 2°C, resultados ubicados dentro de los límites de tolerancia permitidos para el perfil de reflujo de referencia.

Palabras clave: Componentes SMT, arreglo óptico, matriz de leds infrarrojos, proceso de soldado, control, perfil de reflujo.

INTRODUCCIÓN

Capítulo uno

El desarrollo de métodos eficientes y precisos para la soldadura de componentes electrónicos de montaje superficial (SMT por sus siglas en inglés) es crucial en la industria electrónica, donde la miniaturización y la complejidad de los dispositivos aumentan constantemente. La necesidad de asegurar la integridad y funcionalidad de estos componentes durante su proceso de ensamblaje ha impulsado la búsqueda de técnicas de soldadura más avanzadas y controladas.

1.1 Antecedentes

El desarrollo de los componentes electrónicos da inicio con la invención del tubo de vacío a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, siendo éstos los primeros componentes electrónicos activos utilizados en radios, televisores y los primeros ordenadores. [1]

Con el tiempo los tubos de vacío fueron sustituidos por los transistores, inventados en 1947 y que marcaron un hito importante en el desarrollo de la electrónica moderna [2] Éstos abrieron camino para la creación de los primeros circuitos integrados (CI), en la década de los 50's en compañía de los diodos, siendo ambos componentes básicos en los dispositivos electrónicos modernos, mismos que siguen revolucionando la industria electrónica.

Con el avance de la ciencia de los materiales y las técnicas de fabricación, los componentes que en un principio eran voluminosos y que consumían mucha energía, se llevaron a la miniaturización y con ello al desarrollo de nuevos componentes, como microprocesadores, chips de memoria, entre otros, entre las décadas de los 70's y 80's. [3-4]

En un avance con ritmo acelerado, hasta la actualidad, se han seguido desarrollando nuevos materiales y técnicas de fabricación para la creación de componentes más pequeños, eficientes y versátiles.

Es importante mencionar otro aspecto fundamental: los procesos de soldados de componentes. Siendo ésta una de las técnicas más antiguas para unir dos piezas de metal.

Hoy en día, distinguimos entre tres métodos de unión "metalúrgicos": soldadura, soldadura fuerte (o soldadura con estaño) y soldadura blanda. En la rama de la electrónica, la técnica utilizada es la de soldadura blanda, también conocida como soldadura a baja temperatura, siendo un proceso utilizado para unir componentes electrónicos y las placas de circuito impreso (PCI). [5-6]

Su historia se remonta a la antigüedad con pruebas de técnicas de soldadura utilizadas en la metalurgia en el siglo III a.C.; Sin embargo, el proceso de soldadura moderno utilizado para la electrónica surgió a principios del siglo XX, impulsado por el rápido desarrollo de las tecnologías de radio y telefonía.

El proceso consiste en fundir una aleación de metal adicional, normalmente era utilizada una aleación de estaño-plomo, para crear una unión entre los componentes y la placa de circuito impreso.

Aunque las aleaciones de plomo tenían varias propiedades y características destacadas que las hacían populares en la industria electrónica, tales como un bajo punto de fusión, buena fluidez y

humectación, buena resistencia mecánica y costos económicos; entre las décadas de los 60's y 70's la preocupación sobre los riesgos del plomo en el medio ambiente y a la salud humana fue creciendo, acumulándose diversas evidencias científicas sobre su toxicidad.

Comenzando a tomar medidas preventivas, entre las décadas de los 80's y 90's se comenzó la prohibición del uso de plomo en la soldadura para componentes electrónicos, lo que desató que investigadores comenzaran a desarrollar aleaciones de soldadura libres de plomo, usando una combinación de estaño, plata, cobre y otros elementos que pudieran lograr propiedades de soldadura adecuadas. [7]

En el año 2003, la Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas (RoHS por sus siglas en inglés) estableció restricciones sobre el uso de plomo de manera efectiva, impactando significativamente en la industria electrónica a nivel mundial.

Si bien las aleaciones libres de plomo ofrecen beneficios medioambientales, éstas también presentan retos tales como costos más elevados, problemas con la fiabilidad, mayores temperaturas para su procesamiento y un posible desplazamiento del problema. [8-11]

Con el tiempo, el proceso de soldadura ha tenido que evolucionar para poder satisfacer todas las necesidades cambiantes de la industria, como los hechos mencionados anteriormente. Los avances en las técnicas, materiales y equipos de soldadura han permitido la producción de componentes y conjuntos electrónicos más pequeños, complejos y de mayor densidad de producción. [6-7, 12]

Dentro de los procesos de soldadura, los términos de tecnología de montaje pasante (THT por sus siglas en inglés) y SMT son muy importantes. Estos términos son usados para clasificar a los componentes electrónicos; Los componentes tipo THT, como su propio nombre indica, utilizan agujeros en las PCI para montar diferentes componentes electrónicos. Presentan ventajas en el área de ensamblado y ofrece ser una solución adecuada para algunos componentes que manejan corrientes altas. Otras características que presentan es la alta fragilidad y baja resistencia a temperaturas altas, esta última puede hacer que el contacto de las pistas falle, provocando que no se puedan arreglar y queden inutilizables. [13-15]

Por otro lado, los componentes SMT, son soldados directamente en la PCI sobre unas almohadillas de cobre denominadas pads. Éstos, a comparación con los THT, son de tamaño reducido, ligeros y requieren de una cantidad menor de cobre. Se encuentran adaptados a las últimas tecnologías, soportando distintos tipos de ácidos, disolventes y limpiadores, así como mayores temperaturas. La forma en que tienen sus terminales mejora la inductancia y disminuye la resistencia parásita que se da en los encapsulados. [16]

Ahora, enfocándonos a los procesos de soldado de componentes electrónicos, el origen del cautín se remonta a la antigüedad, sin embargo, el cautín eléctrico fue inventado en el año 1921, diseño que utilizaba una resistencia eléctrica para calentar una punta de metal. Éste invento ofrece precisión, debido a que la punta proporciona un contacto directo con la soldadura permitiendo una aplicación precisa en áreas específicas; versatilidad, debido a que pueden ser utilizados para una amplia variedad de tareas; y portabilidad, debido a que son portátiles y pueden ser utilizados en cualquier lugar con acceso a alimentación eléctrica; Es importante tener en cuenta que esta herramienta puede no ser adecuada para trabajos que requieren una alta producción o componentes más pequeños, así como también se tiene que tener en cuenta que puede existir

riesgo de daño térmico si es utilizado incorrectamente. Hasta el día de hoy, el caudín sigue siendo una herramienta fundamental en el mundo de la electrónica y en la industria.

En 1950 se desarrolló el soldado por ola como una solución para la soldadura eficiente de los componentes THT. La técnica inicial implicaba el sumergir una PCI en un baño de soldadura fundida, donde una ola de soldadura se movía a través de la PCI y soldaba las terminales de los componentes a las terminales de la PCI. Este proceso destacó por su eficiencia en la producción en masa, por la soldadura uniforme y confiable en las terminales de los componentes y su aplicabilidad para grandes componentes que no eran adecuados para soldar con caudín. Sin embargo, este proceso contaba con algunas desventajas tales como el que se limitaba a componentes THT, que no era adecuado para componentes sensibles al calor y requería de una gran inversión inicial para obtener el equipo. [17]

Otro instrumento con gran impacto, inventado en la década de los 60's, fue el láser. Desde su invención fue reconocido su gran potencial en una gran variedad de aplicaciones, tanto industriales como científicas, iniciando investigaciones sobre su uso para soldadura de metales y otros materiales. En 1970 y 1980, con los avances obtenidos con la miniaturización, la mejora de su potencia y precisión y el advenimiento de los componentes SMT, surgieron más posibilidades de su uso para el soldado de componentes electrónicos, realizándose investigaciones sobre la soldadura láser selectiva. Con ello, en 1990 se desarrollaron técnicas más avanzadas sobre el control del láser y sistemas de manipulación de la PCI (tipo CNC) para mejorar la precisión y la eficiencia del proceso. [18-21]

Desde entonces, el método de soldado por láser ha continuado evolucionando, mejorando en velocidad, precisión y capacidad de control, desarrollando nuevos métodos y tecnologías complementarias para adaptarse a las nuevas necesidades.

En esos mismos años, en la década de los 60's, también como respuesta al aumento de la miniaturización y la necesidad de un soldado más eficiente y preciso de las PCI, surgió el proceso de soldado por reflujo. Siendo utilizados unos hornos de reflujo, donde se le aplicaba calor a la PCI con los componentes previamente colocados con pasta de soldadura, este calor fundía la soldadura y formaba las conexiones esperadas. Presentaba ventajas tales como la precisión y consistencia, la adaptabilidad para componentes delicados, alta producción y versatilidad en cuestión de las aleaciones de soldadura. Por otro lado, al igual que otros procesos mencionados, requerían de una gran inversión inicial, requería de un gran control para prevenir la formación de defectos, así como para el control de temperatura y tiempo, además requería de un gran espacio y una buena ventilación para poder manejar los vapores emitidos durante el proceso. [22-23]

Otro invento de 1970 fue la estación de aire caliente, pero, no fue hasta los años 80's y 90's, que se empezó a utilizar en la industria electrónica con la introducción del SMT, al igual que el proceso de reflujo. Surgiendo por la necesidad de aplicar calor de una forma más controlada y precisa para componentes electrónicos sensibles al calor. Desde su invención, ha seguido evolucionando, mejorando su precisión, eficiencia y facilidad de uso, siendo ampliamente utilizadas en la industria electrónica para procesos desde la reparación y retrabajo hasta la producción en masa.

Debido a que la industria electrónica sigue creciendo y busca integrar todas las tecnologías que puedan potenciarla, mejorar su calidad y optimizar los procesos buscando activamente soluciones, muchas áreas de investigación se han abierto en el camino.

Las PCI compuestas por diferentes componentes electrónicos han hecho más complejo su ensamblaje y desempeño. Sus propiedades eléctricas, térmicas y físicas determinarán su comportamiento para una aplicación específica. El diseño de estas placas está respaldado con una serie de normas IPC. [12, 24]

Debido a la delicadeza de los componentes electrónicos y la necesidad de eficientizar el proceso de soldado, en los últimos años, los investigadores han propuesto el uso de lámparas infrarrojas y de diodos emisores de luz infrarroja, siendo procesos innovadores y presentando una gran área de oportunidad para investigación y su respectiva implementación. [25-28]

Por lo anterior, el área de interés para investigación de este trabajo se enfoca en el uso del infrarrojo para el soldado de componentes electrónicos.

Existen varias fuentes infrarrojas comúnmente utilizadas, como la convección forzada, las lámparas infrarrojas, y los láseres infrarrojos. Siendo el método de calor por convección el comúnmente utilizado en los hornos de reflujo. Utilizando aire caliente, generado regularmente por resistencias eléctricas y distribuido uniformemente a través de ventiladores para calentar la PCI y los componentes. En el caso de las lámparas infrarrojas, éstas son utilizadas como fuente de calor, emitiendo radiación infrarroja que calienta la superficie de la PCI y los componentes. Este proceso de calentamiento es conveniente para componentes SMT que requieren de un calentamiento rápido y preciso. Por último, los láseres infrarrojos, al igual que las lámparas infrarrojas, son utilizados como fuente potente de calor, con una mayor precisión y rapidez.

Investigaciones recientes han demostrado que las lámparas infrarrojas y diodos emisores de luz infrarrojos optimizan el proceso de soldadura. La luz infrarroja es comúnmente usada en el área de fisioterapia, para tratamientos estéticos, en astronomía para estudiar las atmósferas de las estrellas frías, o bien en equipos de visión nocturna, en cámaras termográficas, mandos a distancias, periféricos como el mouse de la computadora, equipos de medición, etc. [29-34]

Entre las investigaciones del uso del infrarrojo en el proceso de soldadura destacan:

- “Simulación de un sistema para soldar múltiples componentes SMT en un PCB con luz infrarroja” de M.C. Jorge Romo. En este trabajo se presenta un sistema que utiliza una matriz de leds infrarrojos para alcanzar temperaturas de soldado, con el objetivo de controlar la temperatura por zonas en la superficie de un PCI. [28]
- “Efecto de la máscara de irradiación variable en los sistemas de soldadura por luz infrarroja focalizada para componentes electrónicos” de varios autores. En este trabajo se presenta el análisis de irradiancia en la salida de un sistema de soldadura con fuentes infrarrojas focalizadas que utiliza una máscara de irradiación variable con la finalidad de obtener una mejor distribución térmica. [27]
- “Estudio de la capacidad calorífica de sistemas de soldadura con luz infrarroja focalizada” de varios autores. En este trabajo presenta un estudio experimental de diferentes configuraciones

ópticas con la finalidad de desarrollar un sistema de soldadura libre de plomo que utiliza radiación infrarroja. [35]

- “Modelado de la transferencia de calor y optimización de la curva de temperatura del horno en la soldadura por reflujo de las placas de circuitos impresos” de varios autores. Este trabajo presenta un control de temperatura de horno de reflujo por medio de un modelo de transferencia de calor. [36]
- “Monitoreo y control de la temperatura sin contacto de PCBs de bajo coste en un proceso de reflujo de aire caliente basado en la fusión de datos de múltiples termopares” de Tin Lun Lam. Este trabajo presenta un sistema de control de temperatura, para soldaduras libres de plomo, mediante un algoritmo de lógica difusa en tiempo real utilizando termopares. [37]

1.2 Descripción del problema y la propuesta

Si bien, la industria electrónica actualmente es una de las de mayor dinamismo a nivel mundial y se encuentra estrechamente vinculada a la continua innovación y al desarrollo de nuevas tecnologías de vanguardia, contribuyendo de manera relevante al desarrollo económico y social de los países. [38]

Esta misma sigue creciendo y busca integrar todas las tecnologías que se ajusten a sus intereses y los potencien para poder ofrecer alta competitividad en relación con otras empresas que pertenezcan a la misma rama, ofrecer calidad al cliente y buscar obtener para ella misma un proceso óptimo que minimice pérdidas.

La rama de la electrónica es clave para el desarrollo industrial de nuestro país, presentando una evolución favorable y transitando a una industria competitiva y capaz. La innovación y la integración de proyectos en un nuevo proceso puede abrir puertas a áreas de investigación y de aplicación que antes no se habían tomado en cuenta. [39]

Por esta razón, el proceso de soldadura de componentes sobre placas de circuito impreso se ha llevado a cabo con diferentes métodos y herramientas. Dichos métodos han presentado problemáticas con relación a la calidad, funcionamiento y rendimiento de su producto. Por ejemplo, el proceso de soldado por ola, que es un proceso donde la PCI, con los componentes previamente colocados, atraviesa una “cascada” de soldadura que impregna las partes metálicas expuestas de la placa, en muchas ocasiones la soldadura queda en áreas no deseadas creando así problemáticas como malas uniones de soldadura, puentes de soldadura, exceso de soldadura, bolas de soldadura, uniones sobrecalentadas, lapidación de componentes, entre otras.

Otra problemática, consecuencia del desarrollo tecnológico en la fabricación de circuitos integrados, es la introducción de componentes con requerimientos más específicos para su soldado en la placa, dichas especificaciones no se pueden cumplir con los procesos actuales de soldado en masa, para resolver este tipo de problemáticas se ha hecho uso de sistemas compuestos que integran partes automatizadas y manuales.

En la industria electrónica existen diferentes familias y tipos de componentes cuyos perfiles de reflujo son específicos junto con las características y tolerancias que manejan; por ejemplo, mientras que una resistencia SMF7220KJT puede soportar $235^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 2 segundos (sin importar el tipo de soldadura) [40], un receptor de video QPB7432 puede soportar hasta los 260°C como temperatura máxima para un proceso de soldadura sin plomo [41].

El problema de lo anterior nace debido a la distribución de temperatura homogénea que ofrecen los sistemas o equipos de soldado que se manejan actualmente, tal como el de reflujo, por ola, etc.,

estos no diferencian entre las variadas necesidades de cada componente, sección específica o región. Por ello nacen las problemáticas como lo son las soldaduras frías, las uniones sobrecalentadas, componentes dañados, entre otros.

Estas deficiencias de los procesos automatizados se han apoyado con los procesos tradicionales/manuales, convirtiéndose en procesos mixtos para poder aminorar los problemas relacionados con la soldadura y los componentes críticos. Sin embargo, esto no es una solución definitiva sino una alternativa que no ataca el problema de raíz.

1.3 Descripción de la propuesta

Teniendo como objetivo general de esta tesis el desarrollar y validar una metodología teórico-experimental de un sistema de soldadura de componentes electrónicos SMT utilizando radiación infrarroja producida por una matriz de leds, además de lograr un seguimiento de un perfil de reflujo con ayuda de un controlador, se plantean varios objetivos específicos.

Primero, se busca desarrollar un arreglo óptico que incluya el uso de una matriz de leds infrarrojos, lentes colimadoras y una lente convergente, con el fin de generar una mancha homogénea de radiación infrarroja y geometría cuadrada, crucial para proporcionar una distribución uniforme y precisa de calor.

En segundo lugar, se diseña el sistema de soldadura en el programa Ansys. Este diseño nos permitirá realizar un análisis del impacto de la convección forzada en las temperaturas durante el proceso en masa, asegurando que el sistema pueda mantener condiciones térmicas adecuadas para la soldadura de componentes SMT.

Posteriormente, se desarrolla un prototipo escalado del sistema de soldadura debido a limitaciones económicas. Donde finalmente se validará que las condiciones del modelo simulado sean comparables a las del prototipo desarrollado, asegurando la fiabilidad y reproducibilidad del sistema de soldadura propuesto. Siendo esta validación esencial para confirmar que los resultados obtenidos en las simulaciones reflejan adecuadamente las condiciones experimentales del prototipo.

Además, se implementarán diversos controladores para asegurar el seguimiento del perfil de reflujo de referencia de la aleación SAC305 escalada. La implementación de estos controladores permitirá mantener el perfil de reflujo dentro de los límites de tolerancia para la aleación, con errores mínimos.

En resumen, las metas incluyen lograr un diseño óptico preciso, obtener resultados fiables del análisis térmico mediante simulaciones, desarrollar un prototipo funcional con un margen de error mínimo entre las condiciones simuladas y experimentales, e implementar controladores efectivos para el seguimiento del perfil de reflujo; asegurando con ellas una guía clara y estructurada para la investigación y desarrollo del sistema de soldadura, contribuyendo al avance de técnicas de soldadura para procesos en masa en la industria electrónica.

1.4 Organización del trabajo

En el capítulo 1 se provee una introducción de la presente tesis, y con ello el planteamiento del problema, los objetivos y metas del proyecto y sus antecedentes. En el capítulo 2 se habla más detalladamente sobre los fundamentos teóricos que entornan al proyecto y su desarrollo. En el capítulo 3 se muestra el proceso de diseño y simulaciones realizadas. En el capítulo 4 se presentan

los experimentos que fueron llevados a cabo. En el capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones y los experimentos, y finalmente obtienen conclusiones generales obtenidas del trabajo realizado.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Capítulo dos

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos esenciales para comprender el desarrollo del método de soldadura de componentes SMT utilizando radiación infrarroja. Se abordan los conceptos clave y las teorías que sustentan las etapas de la metodología, proporcionando el contexto necesario para entender los procedimientos y los resultados descritos en capítulos posteriores.

2.1 Introducción a la transferencia de calor

La transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. La energía calorífica es transmitida desde zonas de alta temperatura a las de baja temperatura buscando alcanzar el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas. Existen tres tipos de procesos de transferencia de calor o modos: Conducción, Convección y Radiación. [42]

Es utilizado el término de conducción cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, sea este un sólido o un fluido, refiriéndose a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. Por otra parte, el término de convección es utilizado cuando una superficie y un fluido en movimiento se encuentran a diferentes temperaturas. Por último, el modo de radiación térmica; debido a que todas las superficies tienen una temperatura finita y por ello se emite energía en forma de ondas electromagnéticas, en ausencia de un medio, la transferencia de calor por radiación existe entre dos superficies cuando éstas se encuentren a diferentes temperaturas.

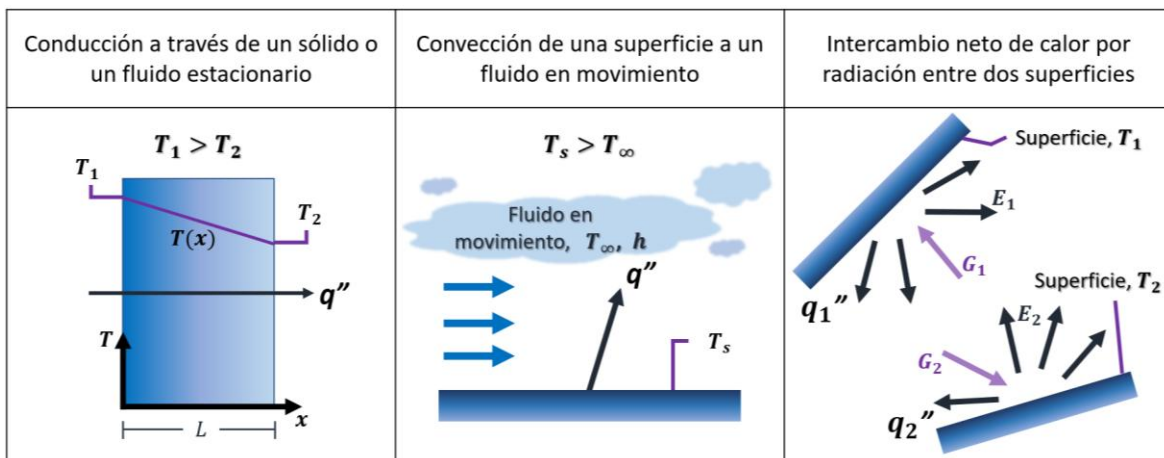


Figura 2.1. Modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo.

Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como ley de Fourier. Para una pared adimensional de altura y largo mostrada en figura 2.1, la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx}$$

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área, q''_x (W/m^2), es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx , en esta dirección. La constante proporcional, k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica ($W/m K$) y es una característica del material. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente. En las condiciones donde la distribución de temperatura es lineal, el gradiente de temperatura se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Y el flujo de calor entonces es:

$$q''_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L}$$

o

$$q''_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

Esta ecuación proporciona un flujo de calor, es decir, la velocidad del calor transferido por unidad de área. El calor transferido por conducción por unidad de tiempo, q_x (W), a través de una pared plana de área, A , es entonces el producto del flujo y el área, $q_x = q''_x \cdot A$.

Para el modo de transferencia de calor por convección, mostrado en la figura 2.1, sin importar la naturaleza particular del proceso, la ecuación o modelo apropiado es de la forma:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.1)$$

Donde q'' es el flujo de calor por convección (W/m^2), proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, y la constante proporcional h ($W/m^2 \cdot K$) se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección. Éste depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte.

Cuando se usa la ecuación 2.1, se supone que el flujo de calor por convección es positivo si el calor se transfiere desde la superficie ($T_s > T_\infty$) y negativo si el calor se transfiere hacia la superficie ($T_\infty > T_s$). Sin embargo, si $T_\infty > T_s$, no hay nada que nos impida expresar la ley de enfriamiento de Newton como:

$$q'' = h(T_\infty - T_s)$$

en cuyo caso la transferencia de calor es positiva si es hacia la superficie.

Mientras que para la transferencia de calor por conducción o por convección se requiere de la presencia de un medio material, para el modo de transferencia de radiación no se precisa. Cabe mencionar que la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío. La radiación que una superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m^2) denominada como la

potencia emisiva superficial, E . El límite superior para la potencia emisiva, está establecida por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

Donde T_s es la temperatura absoluta (K) de la superficie y σ es la constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$). Dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro. El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. Esto depende del material de la superficie y del acabado. La siguiente expresión proporciona la diferencia entre energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

Donde α es una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad cuyo rango va de $0 \leq \alpha \leq 1$, y designamos la velocidad a la que toda la radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la irradiación, G .

Hay muchas aplicaciones para las que es conveniente expresar el intercambio neto de calor por radiación en la forma:

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{alr})$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r es:

$$h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_s - T_{\infty}) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

La forma más sencilla y común para determinar cantidad la transferencia de calor por radiación es:

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

2.1.1 Convección libre

La convección libre, también conocida como convección natural, es un proceso de transferencia de calor en el cual el movimiento del fluido es inducido por diferencias de densidad debidas a las variaciones de temperatura [42-44]. Cuando una superficie tiene una temperatura mayor que la temperatura del fluido que está en contacto con ella, el fluido se expande disminuyendo su densidad. El fluido menos denso tiende a subir, mientras que el fluido más denso desciende, estableciendo un movimiento conocido como celda de convección. Ésta diferencial de densidad genera lo que es conocido como fuerza de flotación. La fuerza de flotación es la principal impulsora en la convección libre y puede expresarse mediante la Ley de Arquímedes que dice que un fluido en un campo gravitatorio experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del fluido desplazado, expresado como:

$$F_b = \rho_f V_d g$$

Donde F_b es la fuerza de flotación (N), ρ_f es la densidad del fluido en el que el cuerpo está sumergido (kg/m^3), V_d es el volumen del fluido desplazado por el cuerpo (m^3) y g es la aceleración debido a la gravedad (aproximadamente $9.81 m/s^2$).

Algunos ejemplos relacionados a la transferencia de calor por convección libre son: enfriamiento de alimentos y un cuerpo en reposo.

Para describir matemáticamente la convección libre se basa en los tres principios relacionados a la mecánica de fluidos y termodinámica: la ecuación de conservación de masa, de momento y de energía. Las ecuaciones de los principios toman en cuenta las siguientes suposiciones:

- 1) El fluido se considera bidimensional e incompresible
- 2) Son constantes la densidad, la viscosidad, el calor específico y el coeficiente de conductividad
- 3) No se toma en cuenta variaciones con respecto al tiempo y presiones
- 4) No hay esfuerzos cortantes

La ecuación de la conservación de masa es:

$$\nabla u = 0$$

Donde u es la velocidad del fluido (m/s).

Para la ecuación de conservación de momento es utilizada la ecuación de Navier-Stokes con un término de flotación, descrita:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g$$

Donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), p es la presión (Pa) y μ es la viscosidad dinámica ($Pa s$). Para convección natural es incorporada la fuerza de flotación mediante la aproximación de Boussinesq, que asume que las variaciones de densidad son pequeñas y pueden ser tratadas linealmente excepto en el término de flotación:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$$

Donde ρ_0 es la densidad de referencia, β es el coeficiente de expansión térmica volumétrica, T es la temperatura local ($^{\circ}C$) y T_0 es la temperatura de referencia ($^{\circ}C$).

Entonces el término de flotación se convierte en:

$$\rho g \approx \rho_0 g - \rho_0 \beta (T - T_0) g$$

Por último, para la ecuación de la conservación de la energía para el fluido es:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T$$

Donde c_p es la capacidad calorífica a presión constante ($J/kg K$) y k es la conductividad térmica del fluido ($W/m K$).

De las tres ecuaciones de los principios resultan números adimensionales para poder simplificar el análisis y encontrar las soluciones. El primero es el número adimensional de Grashof, Gr . Sirve para determinar el coeficiente de convectividad en convección natural, caracterizando la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas en el fluido; se define como:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (2.2)$$

Donde L es la longitud característica (m) y ν es la viscosidad cinemática (m^2/s).

El siguiente número adimensional es el número de Rayleigh, Ra . Éste combina el número de Grashof con el número de Prandtl, Pr , y se define como

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu \alpha} \quad (2.3)$$

Donde α es la difusividad térmica (m^2/s).

El número de Nusselt, Nu , relaciona el coeficiente de transferencia de calor convectivo con la conductividad térmica del fluido. Para convección libre son utilizadas correlaciones empíricas como:

$$Nu = C \times Ra^n \quad (2.4)$$

Donde C y n son constantes que dependen de la geometría y las condiciones del flujo. En la tabla 2.1 se muestran los valores asignados para algunas geometrías.

Tabla 2.1. Valores de C y n para el número de Nusselt por rangos y geometrías para convección libre

Geometría	Tipo de flujo	Rango de Ra	C	n
Placa o cilindro vertical	Laminar	$10^4 - 10^9$	0.59	1/4
	Turbulento	$10^9 - 10^{13}$	0.10	1/3
Placa horizontal, superficie caliente hacia arriba	Laminar	$10^4 - 10^7$	0.54	1/4
Placa horizontal, superficie caliente hacia abajo	Laminar	$10^4 - 10^7$	0.15	1/3
Cilindro horizontal	Laminar	$10^4 - 10^7$	0.48	1/4
	Turbulento	$10^7 - 10^{12}$	0.12	1/3
Esfera	Laminar	$10^4 - 10^7$	0.60	1/4
	Turbulento	$10^7 - 10^{12}$	0.13	1/3

Con el número de Nusselt calculado es posible calcular el coeficiente de convección, h , correspondiente

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (2.5)$$

2.1.2 Convección forzada

La convección forzada es el proceso de transferencia de calor en el que el fluido en movimiento es inducido o propulsado por una fuente externa, como lo son los ventiladores, bombas o viento, en lugar de depender sólo de las diferencias de temperatura. Algunos ejemplos relacionados a la transferencia de calor por convección forzada son: sistemas de calefacción y de ventilación.

El principio básico para este análisis se centra en el movimiento del fluido que es inducido por medios externos, para aumentar su velocidad y, por lo tanto, mejorar la tasa de transferencia de calor a diferencia de la convección libre.

Al igual que el tema anterior, son utilizados números adimensionales para facilitar el análisis y encontrar los resultados. El primer número es el número de Reynolds que, al igual que en número de Rayleigh, caracteriza el flujo del fluido y está definido como:

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot L}{\mu} = \frac{V_{\infty} \cdot L}{\nu} \quad (2.6)$$

Donde V_{∞} es la velocidad del fluido (m/s).

Otro parámetro adimensional es el número de Prandtl, Pr . Éste relaciona la difusión de momento y la difusión térmica en el fluido, y se define:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (2.7)$$

Para el número de Nusselt, al igual que en convección natural, las correlaciones empíricas utilizadas dependen de la geometría y del régimen de flujo (laminar o turbulento). Se define como:

$$Nu = C \times Re^m \times Pr^n \quad (2.8)$$

Donde C , m y n son constantes que dependen de la geometría y las condiciones del flujo. En la tabla 2.2 se muestran los valores asignados para algunas geometrías.

Tabla 2.2. Valores de C , m y n para el número de Nusselt por rangos y geometrías para convección forzada

Geometría	Tipo de flujo	Rango de Re	C	M	n
Sobre placa plana	Laminar	$< 5 \times 10^5$	0.3320	1/2	1/3
	Turbulento	$> 5 \times 10^5$	0.0296	4/5	1/3
Dentro de un tubo	Laminar	< 2300	4.3600	0	0
	Turbulento	> 4000	0.0230	4/5	1/3
Sobre una esfera	Turbulento	> 2000	0.2000	3/5	1/3

Por último, con el número de Nusselt calculado, calculado es posible calcular el coeficiente de convección, h , correspondiente con la ecuación 2.5.

2.2 Introducción a la óptica

Basado de [45], los conceptos ópticos relacionados con el trabajo de tesis se presentan a continuación.

El espectro electromagnético, mostrado en la figura 2.2, es un término que hace referencia a la gama completa de radiación electromagnética, que incluye todas las frecuencias posibles. Esta radiación

se propaga a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas y abarca desde longitudes de onda muy cortas, como los rayos gamma, hasta longitudes de onda muy largas, como las de radio.

Además de lo anterior, existen otras características destacables del espectro electromagnético:

1. Tienen diferentes formas de radiación: Cada región del espectro cuenta con características únicas en términos de su interacción con la materia y su detección.
2. Cuentan con una velocidad constante: Todas las formas de radiación electromagnética viajan a la misma velocidad en el vacío que es la de la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
3. Tienen aplicaciones diversas: Debido a las propiedades únicas de cada región, son utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones.

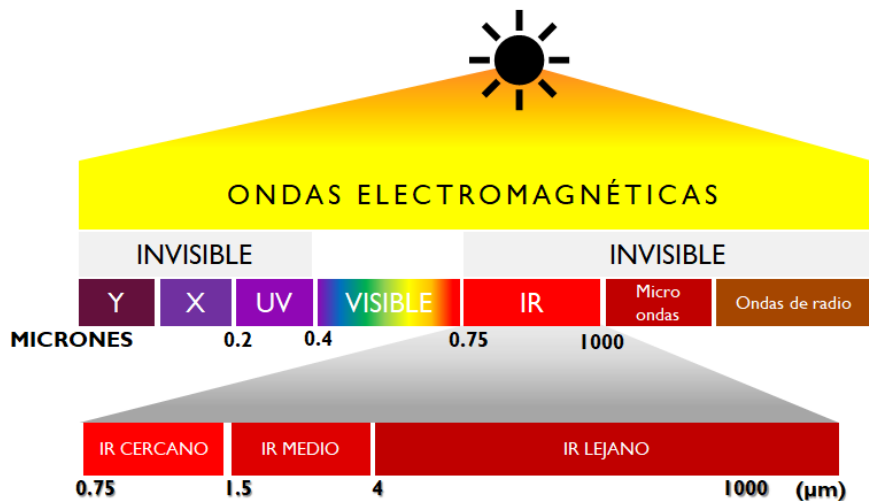


Figura 2.2. Espectro electromagnético con enfoque al espectro infrarrojo

A continuación, se describen de manera resumida cada región del espectro electromagnético:

- Ondas de radio frecuencia: Se encuentran desde unos pocos Hz hasta los 10^9 Hz (λ , desde varios kilómetros hasta 0.3 m aproximadamente). A 1 MHz un fotón de radiofrecuencia tiene una energía de $6.62 \times 10^{-28} \text{ J}$ o $4 \times 10^{-9} \text{ eV}$, una cantidad muy pequeña para medirla. Se han detectado ondas de más de 18 millones de millas de longitud que llegan a la tierra desde el espacio exterior, el extremo se usa en televisión y en la radio.
- Microondas: La región se extiende desde unos 10^9 Hz hasta 3×10^{11} Hz (λ , desde varios 30cm hasta 1mm aproximadamente). Tienen interés tanto para las comunicaciones de vehículos espaciales como para la radioastronomía, telefonía, televisión entre estaciones, etc. Entre ellos involucran una energía de $4.14 \times 10^{-5} \text{ eV}$, su emisión resultante tiene una frecuencia de 9.19263177×10^9 Hz.
- Infrarrojo: Se extiende desde unos 3×10^{11} Hz hasta 4×10^{14} Hz. Se subdivide en el IR cercano, cerca del visible (780-3000 nm), el IR intermedio (3000-6000 nm), el IR lejano (6000-15000 nm) y el IR extremo (15000 nm-1 mm). Las moléculas de cualquier objeto a una temperatura superior al cero absoluto ($-273 \text{ }^\circ\text{C}$) radiará IR, aunque solo débilmente. Aproximadamente la mitad de la energía electromagnética del sol es IR.
- Luz: Corresponde a la radiación electromagnética en la banda estrecha de frecuencias desde unos 3.84×10^{14} Hz hasta 7.69×10^{14} Hz. En la tabla (espectro visible) se muestran los rangos de frecuencia y longitud de onda en el vacío aproximados para los distintos colores.

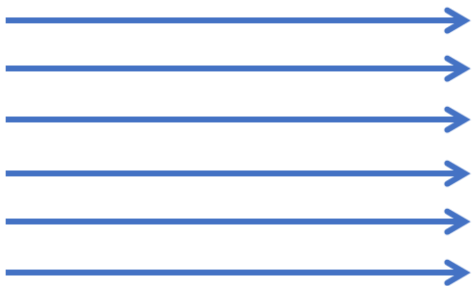
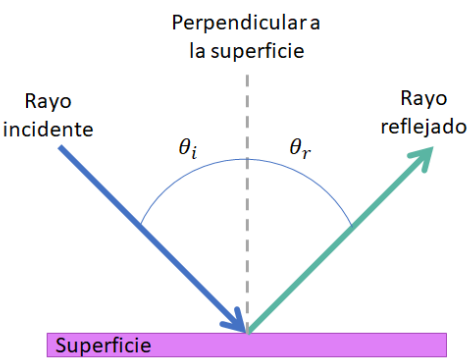
- Ultravioleta: Encontrándose desde los 8×10^{14} Hz hasta 3×10^{16} Hz. Con las energías de los fotones que van desde 3.2 eV hasta 100 eV, los rayos ultravioletas del sol tendrán entonces energía suficiente para ionizar a los átomos en la atmósfera superior y así crear la ionosfera.
- Rayos X: Con una frecuencia desde 2.4×10^{16} Hz hasta 5×10^{19} Hz, su longitud de onda es extremadamente corta. Sus energías fotónicas de 100 eV hasta 0.2 McV, son lo suficientemente grandes para que los cuantos del rayo X puedan interactuar con la materia de uno en uno, casi como balas de energía.
- Rayos gamma: Se trata de las radiaciones electromagnéticas con la longitud de onda más corta y le energía más elevada (10^4 eV hasta unos 10^{19} eV), emitidas por partículas que están sujetas a transiciones dentro del núcleo atómico.

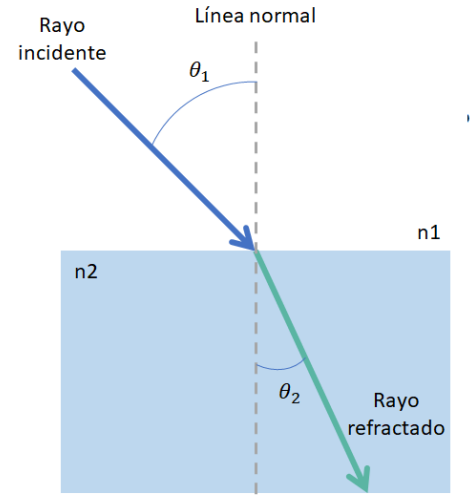
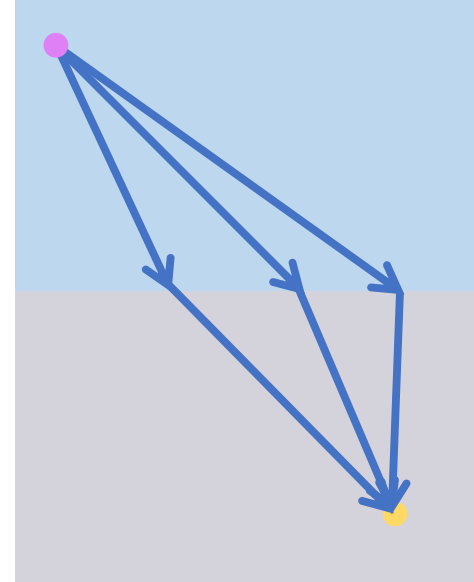
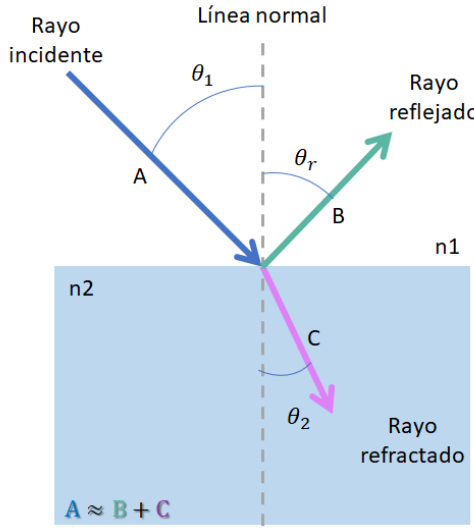
2.2.1 Óptica geométrica

La óptica geométrica es una rama de la física que estudia la manipulación controlada de frentes de onda o rayos, por medio de la interposición de cuerpos reflectantes y/o refractantes, despreciando cualquier efecto de difracción.

Los principios básicos en la óptica geométrica se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Principios básicos de la óptica geométrica

Principio	Descripción	Ejemplo
El principio de la propagación rectilínea de la luz	En un medio homogéneo e isotrópico, los rayos de luz se propagan en líneas rectas debido a que hay ausencia de obstáculos o cambios en el medio	
La ley de la reflexión	Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflectante, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, expresado $\theta_r = \theta_i$	

<p>La ley de la refracción</p>	<p>También conocida como la ley de Snell, es una fórmula utilizada para describir la relación entre un ángulo de incidencia y de refracción, expresado</p> $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$	 <p>The diagram shows a horizontal interface between two media. The upper medium is labeled 'n1' and the lower medium is labeled 'n2'. A vertical dashed line represents the 'Línea normal'. A blue arrow labeled 'Rayo incidente' points towards the interface from the upper medium, making an angle θ_1 with the normal. A green arrow labeled 'Rayo refractado' points away from the interface into the lower medium, making an angle θ_2 with the normal.</p>
<p>El principio de Fermat</p>	<p>Establece que una trayectoria real que la luz sigue entre dos puntos es aquel que toma menor tiempo</p>	 <p>The diagram shows a horizontal boundary between a light blue upper medium and a grey lower medium. A pink dot is located in the upper medium, and a yellow dot is in the lower medium. Several blue arrows represent different paths from the pink dot to the yellow dot. Some paths are straight lines in one medium, while others cross the boundary at different points. The path that crosses the boundary at a specific point is highlighted as the 'real' path.</p>
<p>Conservación de la energía</p>	<p>Asume que la cantidad de energía de la luz se conserva cuando los rayos de la luz se reflejan o se refractan</p>	 <p>The diagram shows a horizontal interface between two media, 'n1' (top) and 'n2' (bottom). A vertical dashed line is the 'Línea normal'. A blue arrow labeled 'Rayo incidente' (A) approaches the interface at angle θ_1. A green arrow labeled 'Rayo reflejado' (B) leaves the interface at angle θ_r. A pink arrow labeled 'Rayo refractado' (C) enters the lower medium at angle θ_2. At the bottom left, the equation $A \approx B + C$ is written, indicating energy conservation.</p>

Algunos elementos en los que puede ocurrir la refracción son los lentes, prismas y agua; en cambio, para la reflexión, algunos elementos ópticos son los espejos, los reflectores y lentes sin película antirreflejante.

2.2.1.1 Lentes

La lente es el elemento óptico más utilizado. Es un dispositivo refractor que reconfigura la distribución de la energía emitida. Se pueden clasificar por la forma de sus superficies y como enfocan la luz: lentes esféricas y asféricas, y convexas y cóncavas.

Las lentes esféricas tienen superficies que son partes de una esfera, que, para converger o divergir, por la naturaleza de su forma se producen aberraciones esféricas. Considerando como aberración esférica cuando la luz que pasa a través de la periferia del lente no se lleva al foco en el mismo plano que la que viaja a través del centro del lente.

En el caso de las asféricas, sus superficies no corresponden a partes de una esfera, sino que su curvatura varía desde su centro hasta los bordes. Están diseñadas para minimizar las aberraciones esféricas, obteniendo un enfoque más preciso.

La comparación de ambos tipos de lentes se muestra en la figura 2.3.

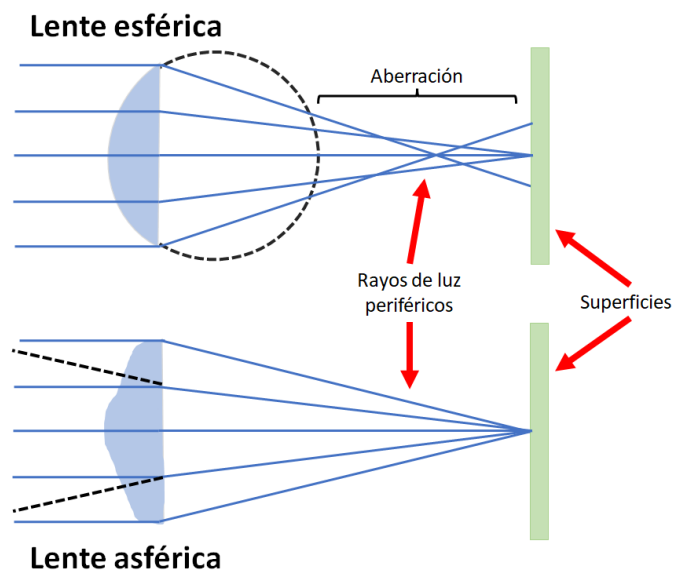


Figura 2.3. Ilustración de comparación entre una lente esférica contra una lente asférica

El índice de refracción, n , es utilizado para describir la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo como las lentes, se define como:

$$n = \frac{c}{v}$$

Donde n es el índice de refracción de la lente, c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio.

Además, los rayos refractados obedecen a la ley de refracción ya mencionada y definida como:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

La distancia focal, definida entre el centro óptico de la lente y el punto focal cuando se enfoca al infinito, está dada por:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Donde f es la distancia focal y R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las superficies.

Las lentes esféricas tienen una forma cónica y su superficie, descrita por una expansión polinomial de la desviación de la superficie esférica, dada por:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_1r^4 + \dots$$

Donde c es el recíproco del radio de curvatura, k es la constante cónica y r es la coordenada del rayo radial en unidades de la lente.

Por otra parte, las lentes convexas, también conocidas como lentes convergentes, son lentes cuya superficie es más delgada en los bordes y más gruesa en el centro. Se pueden encontrar diferentes tipos de lentes: plano-convexas, biconvexas y menisco convergente.

En el caso de las lentes cóncavas, también conocidas como lentes divergentes, tienen la característica de tener los extremos gruesos y un centro delgado. Se pueden encontrar diferentes tipos de lentes: plano-cóncavas, bicóncava y menisco divergente.

En la figura 2.4 se muestran los tipos de lentes mencionados anteriormente.

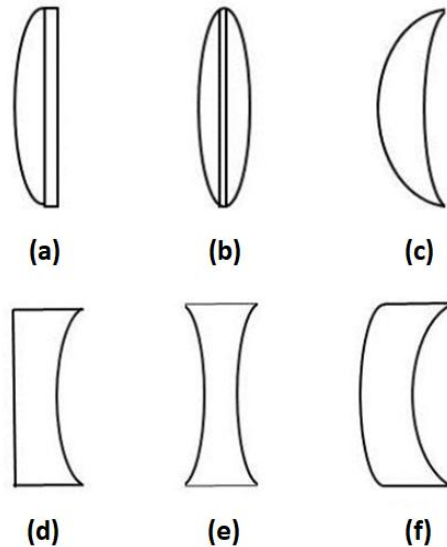


Figura 2.4. Tipos de lentes, (a) plano-convexa, (b) biconvexa, (c) menisco convergente, (d) plano-cóncava, (e) bicóncava, (f) menisco divergente

Un parámetro a tomar en cuenta para la selección de los lentes es la apertura numérica $N.A.$, ésta describe la capacidad de captación de la luz. En un medio de refracción, n , y la apertura numérica, se obtiene:

$$N.A. = n \text{ sen } \theta$$

Donde θ es el ángulo de incidencia del haz con respecto a la normal.

2.2.1.2 Películas antirreflectoras

Una película antirrefleitora es una capa delgada de material óptico, aplicado en la superficie de los elementos ópticos. Su objetivo es mejorar la transmisión de la luz a través del material y aumentar la calidad de la imagen reduciendo reflejos no deseados.

Las películas reflectoras funcionan mediante el principio de interferencia destructiva. Se aplican estas capas diseñadas para que las ondas de luz reflejadas en las interfaces entre la capa y el elemento, interfieran entre sí de manera destructiva cancelando gran parte de la luz reflejada.

Cuando la luz pasa a través de un elemento óptico sin película antirrefleitora, se tiene aproximadamente un 4% de reflexión en cada interfaz, resultando un 8% de pérdida de reflexión debido a ambas caras o superficies del elemento.

La ley de conservación de la energía es muy importante en el análisis de lentes, definida como la suma de la intensidad transmitida Γ , reflejada σ , y la absorbida α , debe ser igual al haz incidente I_0 en cualquier superficie. Expresado de la siguiente manera

$$\Gamma + \sigma + \alpha = I_0$$

En la figura 2.5 se muestra la ley de la conservación de la energía encontrando los fenómenos de transmisión, reflexión y absorción en una superficie.

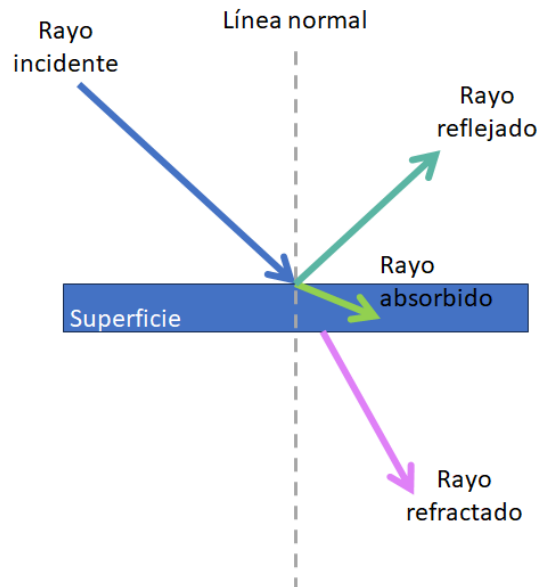


Figura 2.5. Ilustración de transmisión, reflexión y absorción de un haz incidente sobre una superficie

Para que se produzca la interferencia destructiva es necesario cumplir con ciertas condiciones. La primera condición requiere que las ondas estén desfasadas por una diferencia de 180° . La segunda condición requiere que las ondas cuenten con la misma frecuencia y longitud de onda. Por último, se requiere que las ondas cuenten con una amplitud similar para una cancelación completa.

2.2.2 Radiometría

La radiometría es la ciencia que se encarga de la medición de la radiación electromagnética, en términos de energía. Dentro de la radiometría, se encuentran dos magnitudes fundamentales, la irradiancia y la radiancia, que describen cómo se distribuye esta energía en el espacio.

La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Las unidades en que se mide son las unidades radiométricas (W/m^2).

En caso contrario, la radiancia describe la cantidad de radiación electromagnética que es emitida por un área en particular en un ángulo sólido en una dirección específica. Las unidades en que se mide son las unidades radiométricas por estereorradián (W/m^2sr).

En la figura 2.6 se muestra una comparación de ambas magnitudes.

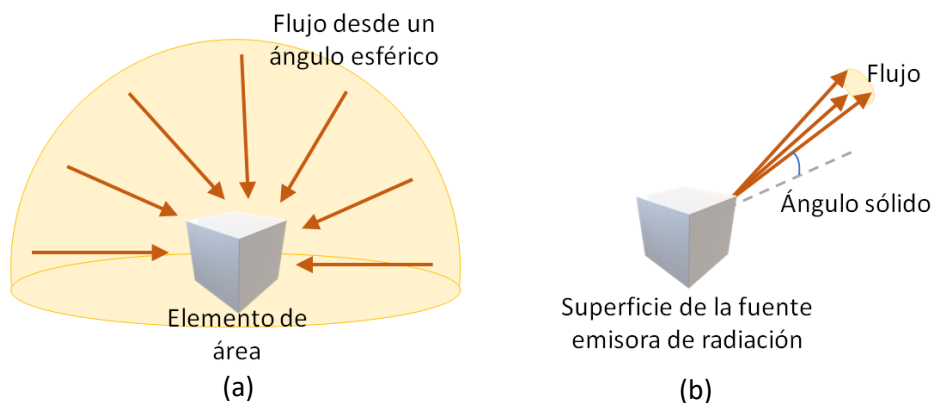


Figura 2.6. Magnitudes de radiometría, (a) irradiancia, (b) radiancia

2.3 Introducción a la teoría de control

El control se refiere al proceso de regular un comportamiento o estado de un sistema para que se ajuste a ciertos criterios o especificaciones necesarias o deseadas. Esto se logra mediante aplicación de señales de control, como dispositivos mecánicos, eléctricos, computacionales o electrónicos, con la finalidad de hacer el cambio de estado en el comportamiento del sistema.

Definimos un sistema como un objeto o proceso que se controla, puede ser físico, como una máquina o un proceso, o abstracto, como un algoritmo informático o un sistema biológico.

También es importante que definamos el proceso de control, siendo este un conjunto de acciones o algoritmos que determinan como se debe manipular un dato de entrada para lograr el comportamiento deseado en la salida del sistema.

Existen dos tipos de control, el control manual y el control automático. Siendo el primero como aquella intervención humana directa que ajusta los parámetros manualmente, y el segundo se basa en el uso de dispositivos o algoritmos que ayudan a regular automáticamente el comportamiento del sistema.

Este último suele dividirse en dos tipos de control automático: lazo abierto y lazo cerrado. El primero aplica una señal de control predeterminada sin medir la salida del sistema para realizar ajustes. Por

el contrario, el segundo utiliza retroalimentación para comparar la salida del sistema con el valor de entrada deseado y realizar los ajustes que sean necesarios.

En la figura 2.7 se muestra una comparación de los tipos de control automático.

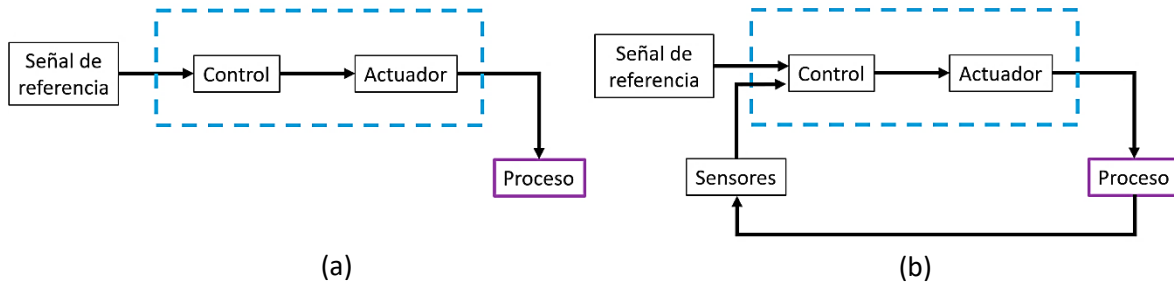


Figura 2.7. Ilustración de control automático, (a) sistema de control en lazo abierto, (b) sistema de control en lazo cerrado

En un sistema de control se integran diferentes componentes. Iniciando por la variable de proceso, siendo ésta el parámetro del sistema que debe controlarse, como la temperatura, una tasa de flujo, etc. La siguiente componente es el punto de referencia o señal de entrada, que es el valor deseado o de comando para la variable del proceso. La diferencia entre la lectura de la variable del proceso y el punto de referencia, conocida como error $e(t)$, es utilizada por el algoritmo de control en lazo cerrado para accionar el sistema, actuador o planta.

Existen otros tipos de control cuya finalidad es mejorar la estabilidad, precisión y eficiencia del sistema. Entre estos otros sistemas se encuentran:

- Control Proporcional-Integral-Derivativo
- Control difuso
- Control basado en eventos

Profundizando sobre el sistema de control PID, siendo el algoritmo de control más comúnmente utilizado en la industria, el cual permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado [46]. Este controlador está compuesto por tres elementos que proporcionan una acción proporcional, integral y derivativa. En la figura 2.8 se muestra el diagrama general de este tipo de control.

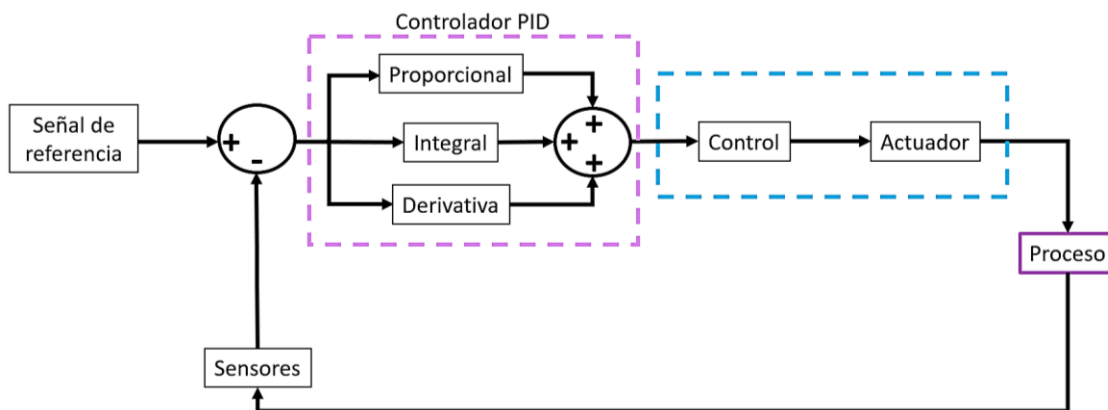


Figura 2.8. Diagrama de sistema de control en lazo cerrado con PID

La acción de control proporcional multiplica la señal de error por una constante K_p que determina la cantidad de acción proporcional que tendrá el controlador. Si bien el aumentar el valor de K_p tiene efectos positivos como el aumentar la velocidad de respuesta del sistema o disminuir el error del sistema en régimen permanente, también aumenta la inestabilidad del sistema.

Por otra parte, la acción derivativa, como su nombre lo indica, multiplica una constante K_d por la derivada de la señal de error. Los efectos que tiene esta acción derivativa van desde aumentar la estabilidad del sistema controlado, disminuir un poco la velocidad del sistema y mantener al error en régimen permanentemente igual.

Por último, la acción integral multiplica una constante K_i con la integral de la señal de error. Esta acción se puede ver como la suma de la señal de error que, con el paso del tiempo, va sumando pequeños errores para que la acción integral sea cada vez mayor. Los efectos de esta acción hacen que disminuya el error del sistema en régimen permanente, incrementa un poco la velocidad del sistema aumentando a la par su inestabilidad.

Las acciones de sintonización manual siguen tres sencillos pasos, basados en [46]:

1. Se aumenta poco a poco la constante proporcional K_p para disminuir el error y aumentar la velocidad de respuesta.
2. Si el sistema se encuentra demasiado inestable, se añade poco a poco la constante derivativa K_d para conseguir estabilizar la respuesta.
3. En caso de que el error del sistema sea mayor que el deseado, se comienza a aumentar la constante integral K_i para minimizar el error con la rapidez deseada. En caso de que el sistema se vuelva inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.

Es importante destacar que en los sistemas reales existen limitaciones que reducen la capacidad del controlador para conseguir la respuesta deseada. Por mucho que se trate de aumentar la acción proporcional, llegará un momento en el que el accionador se saturará.

2.4 Componentes y procesos de soldadura

Los componentes electrónicos son dispositivos que forman parte de los circuitos electrónicos, éstos se suelen encapsular generalmente en un material cerámico, metálico o plástico, y normalmente tienen dos o más terminales metálicas. Las placas de circuito impreso están compuestas por diferentes componentes electrónicos, y éstos pueden clasificarse principalmente en dos, de acuerdo con su tecnología de montaje: THT y SMT.

Enfocándonos en los componentes SMT, este tipo de componentes son soldados de forma directa a la superficie de la PCI en los pads. Éstos, a comparación con THT, son de tamaño reducido, ligeros y requieren de una cantidad menor de cobre. Se encuentran adaptados a las últimas tecnologías, soportando distintos tipos de ácidos, disolventes y limpiadores, así como mayores temperaturas. La forma en que tienen sus terminales mejora la inductancia y disminuye la resistencia parásita que se da en los encapsulados. [47]

Definimos soldadura como una técnica utilizada para la unión de dos piezas metálicas, en electrónica el método de unión metalúrgico empleado es el de soldadura blanda, que es empleado en las técnicas para el soldado de los variados tipos de componentes. Dividiéndose en dos categorías,

dependiendo del proceso: en unitario, entre los que podemos encontrar al soldado por caudín [48-49] y por estación de aire caliente [50]; y en masa, donde encontramos el soldado por ola [51-52], reflujo [53-54] y de pin-in-paste [55].

El método de soldadura blanda se da debido a la reacción superficial entre el metal que se busca soldar, conocido como sustrato, y la soldadura fundida. Esta reacción es crucial para la unión soldada resultante y, por lo tanto, para el proceso en sí. El producto de la reacción es un compuesto intermetálico, el cual crea cristales duros y frágiles, formados en la interfaz. Éstos conforman la capa intermetálica, también nombrada “zona de difusión”, teniendo un amplio efecto en las propiedades mecánicas de la unión soldada y sobre el comportamiento durante su vida útil.

Existen compuestos, como el óxido o el sulfuro, que forman una capa superficial no metálica que, por muy delgada que sea, impiden la reacción y, por lo tanto, la soldadura. Sin la eliminación de esta contaminación, la reacción no podrá ocurrir. Lamentablemente, en circunstancias comunes, todos los sustratos, con excepción del oro y el platino, llevan una capa no metálica, por muy limpia que este pudiese parecer.

El flux es el encargado de eliminar esta capa y de evitar que se vuelva a formar durante el proceso de soldadura, lo cual permitirá que se produzca la reacción entre el sustrato y la soldadura. Una capa de óxido sobre la superficie impediría su correcta colocación. Encontrándose ambos componentes limpios, se podrá estañar al sustrato.

Por lo tanto, la naturaleza y la resistencia del vínculo entre el soldador y el sustrato no dependen de la naturaleza o calidad del fundente. Lo único que depende de la calidad del fundente es la calidad de la unión que se haya formado.

En resumen, para que una unión pueda ser soldada se requiere de tres elementos indispensables:

- a. Flux para limpiar las superficies de la unión de manera que el soldador pueda estañarlas.
- b. Soldadura, para rellenar la unión.
- c. Calor, para fundir la soldadura, estañar las superficies de la unión y rellenarla.

Para el soldado de componentes, es clave conocer algunas características importantes como lo son las características del estaño y sus aleaciones, y las características del perfil de reflujo.

2.6 Características de soldadura y problemáticas

Como se mencionó anteriormente, las características esenciales de una aleación de soldadura sin plomo aceptable están relacionadas con el montaje de la PCI y la fiabilidad. Una unión de soldadura debe solidificarse sin que se formen defectos que ponga en riesgo su integridad, descritos en la tabla 2.4. [16]

Tabla 2.4. Criterios de selección de aprobados-suspendidos

Propiedad de la soldadura	Definición	Niveles aceptables
Temperatura del líquido	Temperatura a la que la aleación de soldadura está completamente fundida.	< 225°C
Rango de pastosidad	Diferencia de temperatura entre las temperaturas de liquidez y solidez. Representa el rango de temperatura en el que la aleación es en parte sólida y en parte líquida.	< 30°C
Humectabilidad	Una prueba de equilibrio de humectación evalúa la fuerza resultante cuando un alambre de cobre se sumerge en un baño de soldadura fundida y se moja en él. Una fuerza grande indica una buena humectación, al igual que un tiempo corto para alcanzar una fuerza de humectación de cero y un tiempo corto para alcanzar un valor de dos tercios de la fuerza de humectación máxima.	$F_{max} > 300 \mu N$ $t_0 < 0.6 \text{ seg}$ $t_{2/3} < 1 \text{ seg}$
Área de cobertura	Evalúa la cobertura de la soldadura sobre el Cu después de una prueba de inmersión típica.	> 85% de cobertura
Escoriaciones	Evalúa la cantidad de óxido formado en el aire en la superficie de la soldadura fundida después de un tiempo fijo a la temperatura de soldadura.	Escala cualitativa
Fatiga termo mecánica (TMF-1)	Ciclos-hasta-el-fallo para un determinado porcentaje de fallo de una población de prueba basada en una configuración específica de junta de soldadura y placa, en comparación con el SN-Pb eutéctico.	Algún porcentaje, normalmente > 50%
Coefficiente de expansión térmica (CET)	Coefficiente de expansión térmica de la longitud por °C de cambio de temperatura. El valor utilizado para la comparación fue el CET de la aleación de soldadura a temperatura ambiente.	< $2.9 \times 10^{-5} / ^\circ C$
Fluencia	Esfuerzo necesario a temperatura ambiente para provocar falla en 10,000 minutos.	> 3.4 MPa
Elongación	Porcentaje total de alargamiento del material bajo tensión uniaxial a temperatura ambiente.	>> 10%

Otra característica importante del proceso de soldado de componentes es el perfil de temperatura. Éste se define por la relación de la temperatura en función del tiempo durante el calentamiento. Hay dos tipos básicos de perfiles de temperatura: Ramp-Soak-Spike (RSS), mostrado en la figura 2.9, y Ramp-to-Spike (RTS), mostrado en la figura 2.10.

Los perfiles de temperatura RTS son recomendados para la mayoría de las aplicaciones donde se requiere el proceso de soldadura con un rendimiento óptimo. Por otra parte, los perfiles de temperatura RSS son apropiados cuando el ensamble tiene una masa térmica o un diferencial de temperatura (ΔT) grande.

El perfil del componente debe verificarse en las especificaciones que señale el fabricante, para garantizar que no se exceda el límite de temperatura. Antes de definir un perfil del proceso y de reflujo se recomienda revisar la sensibilidad térmica de los componentes de la hoja del fabricante [56]. En la tabla 2.5 y 2.6 se muestran las especificaciones recomendadas para cada tipo de perfil.

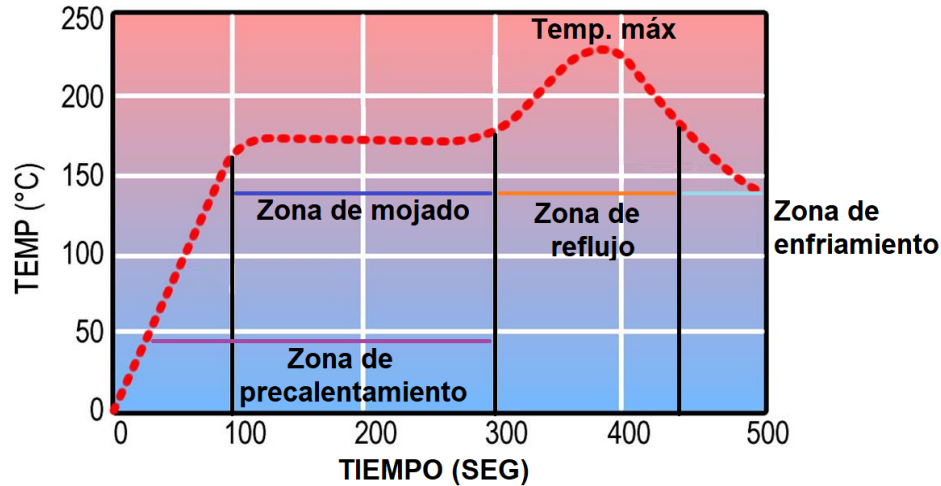


Figura 2.9. Perfil de reflujo Ramp-Soak-Spike (RSS).

Tabla 2.5. Características del perfil de reflujo RSS.

Característica del Perfil	Perfil general	Flux No Clean (Punto de partida recomendado)	Flux Soluble en Agua (Punto de partida recomendado)
Rampa de calentamiento	< 3°C/seg	1-3°C/seg	1.5-3°C/seg
Zona de remojo (Ts)	150°C-200°C	150°C-200°C	140°C-160°C
Tiempo de remojo (Pt)	< 180 seg	30-90 seg	30-60 seg
Tiempo sobre líquido (TAL)	30-90 seg	30-90 seg	30-90 seg
Temp. Máxima (Tp)	230°C-260°C	230°C-260°C	230°C-260°C
Velocidad de enfriamiento	< -6°C/seg	< -4°C/seg	< -4°C/seg
Tiempo desde los 40°C hasta el pico	< 6 min	3-4.5 min	3-4 min

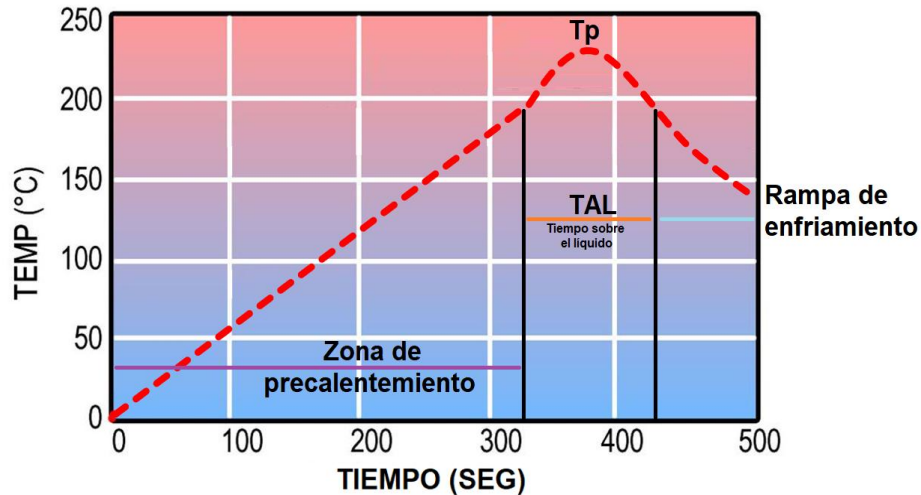


Figura 2.10. Perfil de reflujo Ramp-To-Spike (RTS).

Tabla 2.6. Características del perfil de reflujo RTS.

Característica del Perfil	Perfil general	Flux No Clean (Punto de partida recomendado)	Flux Soluble en Agua (Punto de partida recomendado)
Rampa de calentamiento	< 3°C/seg	1-3°C/seg	1.5-3°C/seg
Tiempo sobre líquido (TAL)	30-90 seg	30-90 seg	30-90 seg
Temperatura máxima (Tp)	230°C-260°C	230°C-260°C	230°C-260°C
Velocidad de enfriamiento	< -6°C/seg	< -4°C/seg	< -4°C/seg
Tiempo desde los 40°C hasta el pico	< 6 min	3-4.5 min	3-4 min

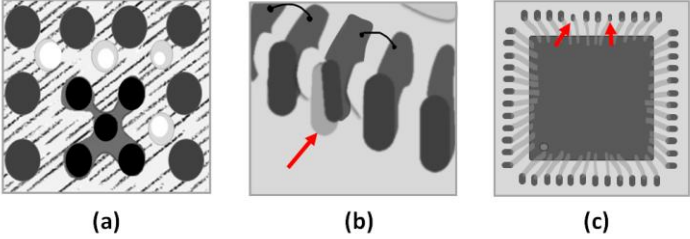
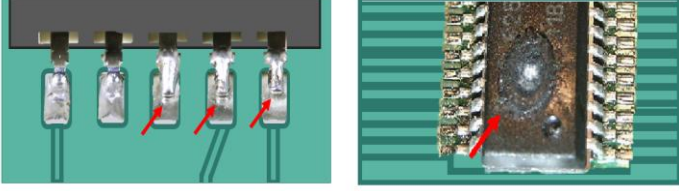
Existen diferentes problemáticas derivadas del proceso de soldadura. Estos problemas suelen estar relacionados por un factor de temperatura no adecuado, aleaciones de soldadura no compatibles con el proceso, procesos que no funcionan con el tipo de componentes o sus condiciones no son las adecuadas.

Los problemas más comunes son: las malas uniones de soldadura, puentes de soldadura, exceso de soldadura, bolas de soldadura, soldadura fría, uniones sobrecalentadas, lapidación de componentes, derretimiento insuficiente, saltos de soldadura, almohadillas levantadas, soldadura carente y salpicaduras de soldadura. [16, 57]

En la tabla 2.7 se muestran los problemas más comunes y sus causas.

Tabla 2.7. Relación problemática-causa

Problema	Imagen	Causa
Efecto Popcorn		Mecanismo de falla común de los dispositivos microelectrónicos encapsulados de plástico debido a una humedad

	Ejemplo del efecto Popcorn: Hoja de cobre perdida en el lugar de la delaminación	presente en él [58-61]
Uniones con alturas diferentes, excesos de soldadura, vacíos/huecos, mala auto alineación o efecto lápida	 <p>(a) (b) (c)</p> <p>Ejemplos de defectos de soldaduras, (a) Cortos entre esferas en un BGA, (b) Defecto de soldadura en un pin, (c) Múltiples soldaduras defectuosas</p>	Mal control del volumen de soldadura colocado: excesos, carencias, diferencias [62-64]
Sobrecalentamiento, soldadura fría	 <p>(a) (b)</p> <p>Ejemplos de problemas de soldadura, (a) Soldadura fría, (b) Sobrecalentamiento</p>	Mal control de temperatura, falta de seguimiento del perfil de reflujo [65-67]

DISEÑO Y SIMULACIÓN

Capítulo tres

Teniendo en cuenta la teoría obtenida del capítulo dos de Fundamentos teóricos, en este capítulo se hablará del diseño y las simulaciones que fueron realizadas para un sistema capaz de soldar componentes del tipo SMT por áreas en un proceso de soldado en masa, con el uso de leds infrarrojos y su correspondiente arreglo óptico.

Zemax es un programa de diseño óptico utilizado para simular y optimizar sistemas ópticos. Su finalidad principal es ayudar a diseñar sistemas ópticos eficientes y precisos, ofreciendo la facilidad para el diseño de lentes, espejos, fuentes de luz, un diseño óptico en espacio libre, entre otros.

Algunos de los beneficios de este programa es que Zemax permite crear modelos detallados y precisos para poder simular el comportamiento óptico con alta fidelidad, ofrece herramientas avanzadas de optimización para maximizar el rendimiento y eficacia de los sistemas, proporciona capacidades de análisis detallado para evaluar el rendimiento óptico de los sistemas diseñados, incluyendo el análisis de aberraciones, difracción, dispersión, etc.; El programa permite también realizar iteraciones rápidas, para poder evaluar rápidamente los efectos de rendimiento óptico.

Una característica importante de resaltar de este programa es que cuenta con dos tipos de modos para realizar las simulaciones. El primer modo es el secuencial, utilizado para sistemas ópticos donde los rayos de luz siguen una trayectoria predeterminada a través de los componentes ópticos, reflejándose y refractándose según las leyes de la óptica geométrica; Este modo es ideal para sistemas que funcionan con luz coherente. El segundo modo es el no secuencial donde son simulados sistemas ópticos donde la luz no sigue una trayectoria predeterminada, en este modo en vez de utilizarse una simulación de trayectoria por rayos individuales, son utilizados métodos numéricos para calcular la distribución de luz de todo el sistema. Este modo es adecuado para sistemas de luz que funcionan con luz incoherente, como los sistemas de iluminación led, con fuentes de luz difusa o los sistemas de detección.

Zemax fue seleccionado para la simulación del arreglo general de leds infrarrojos con su correspondiente arreglo de multi lentes y su lente de fresnel. Varias simulaciones fueron ejecutadas utilizando este programa y los resultados obtenidos de cada simulación fueron analizados de acuerdo al tamaño de la mancha de luz, su irradiancia y su distribución espacial de luz.

Por otro lado, Ansys es un programa de simulación de ingeniería utilizado para simular, modelar y analizar una amplia variedad de fenómenos físicos en campos como la mecánica estructural, la dinámica de fluidos, electromagnetismo, transferencia de calor, dinámica de partículas, entre otros. La finalidad principal de este programa es proporcionar herramientas avanzadas para predecir ciertos comportamientos y rendimiento de equipos, sistemas o productos.

Algunos de los beneficios principales de Ansys es que ofrece capacidades de simulación avanzada que permite modelar y analizar el comportamiento físico de sistemas complejos con un alto grado de detalle y precisión, proporciona también herramientas de optimización para que los diseños cumplan con requisitos de rendimiento y restricciones específicas; Además, este programa es utilizado en una gran variedad de industrias, desde la aeroespacial, la automotriz, hasta la

energética, médica o electrónica, demostrando su versatilidad y aplicabilidad a diferentes campos de la ingeniería y diseño.

Dos tipos de análisis son de interés para el presente trabajo: análisis de estado estacionario térmico y el análisis térmico transitorio; ambas herramientas son importantes en el área de ingeniería térmica. El primero se evalúa en un sistema después de que las condiciones de carga térmica y las condiciones de contorno alcanzan un equilibrio térmico, es útil para determinar la distribución de temperatura en un sistema bajo condiciones de operación estables y constantes; Este análisis ayuda para la evaluación de la distribución de temperatura en componentes electrónicos bajo carga térmica constante. El segundo análisis evalúa los cambios de distribución de temperatura en un sistema a lo largo del tiempo en respuesta a cambios en las condiciones de carga térmica o en las condiciones del entorno, tiene en cuenta la inercia térmica y los efectos de almacenamiento de calor en el sistema permitiendo simular eventos transitorios de encendido y apagado de equipos, cambios de carga térmica o variaciones ambientales; Este análisis es útil para predecir cómo responderá un sistema a cambios repentinos en las condiciones térmicas y también para evaluar su estabilidad térmica durante los eventos transitorios. También, es importante mencionar que este último ayuda para la evaluación del comportamiento térmico de dispositivos electrónicos durante el encendido y apagado, ciclos de funcionamiento y eventos de sobrecarga, así como también para la simulación de procesos térmicos transitorios, como el calentamiento y enfriamiento de componentes durante operaciones de fabricación.

Ansys fue seleccionado para la simulación del sistema. Varias simulaciones fueron ejecutadas utilizando este programa y los resultados obtenidos de cada simulación fueron analizados de acuerdo a las temperaturas obtenidas y su distribución térmica.

Como fuente de luz seleccionada para los sistemas simulados, fue escogido un led infrarrojo, de acuerdo a las características que presentan este tipo de led de alta potencia y la configuración de la matriz y arreglo óptico, alcanzan las temperaturas necesarias para el soldado de componentes. El resto de los elementos ópticos, fueron seleccionados de proveedores de acuerdo a las necesidades definidas durante el proceso de diseño simulación.

Los elementos seleccionados se describen a continuación.

3.1 Sistema para soldar

Como sistema para soldar se hace referencia a un sistema cuyas características contribuyen a alcanzar las temperaturas necesarias para el proceso de soldado de componentes. Este sistema cuenta con una matriz de leds y lentes de 10x10.

3.1.1 Led infrarrojo

Para caracterizar el led, en el programa Zemax, los parámetros necesarios utilizados son obtenidos de la gráfica espectral de emisión y sus características específicas de radiación. La primera gráfica, mostrada en la figura 3.1, ayuda a localizar el rango espectral emitido dentro del espectro infrarrojo para los leds SFH 4728AS con potencia de consumo eléctrico de $1000mW$, encontrado entre los $800nm$ a los $1025nm$. En la tabla 3.1 son mostrados los pesos asignados de acuerdo a la gráfica mencionada anteriormente.

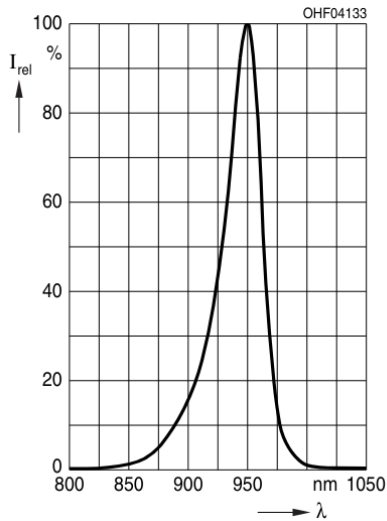


Figura 3.1. Emisión espectral relativa del led SFH 4728AS, figura obtenida de [68]

Tabla 3.1. Espectro de emisión del led SFH 4728AS

#	Longitud de onda (nm)	Peso
1	800	0
2	825	0.003
3	850	0.014
4	875	0.050
5	900	0.156
6	925	0.446
7	950	1
8	975	0.140
9	1000	0.012
10	1025	0.005
11	1050	0

En el caso de la segunda gráfica, mostrada en la figura 3.2, se complementa el diseño añadiendo la característica de radiación en función del ángulo de apertura del lente del led. En la tabla 3.2 son mostrados los pesos asignados de acuerdo con la gráfica.

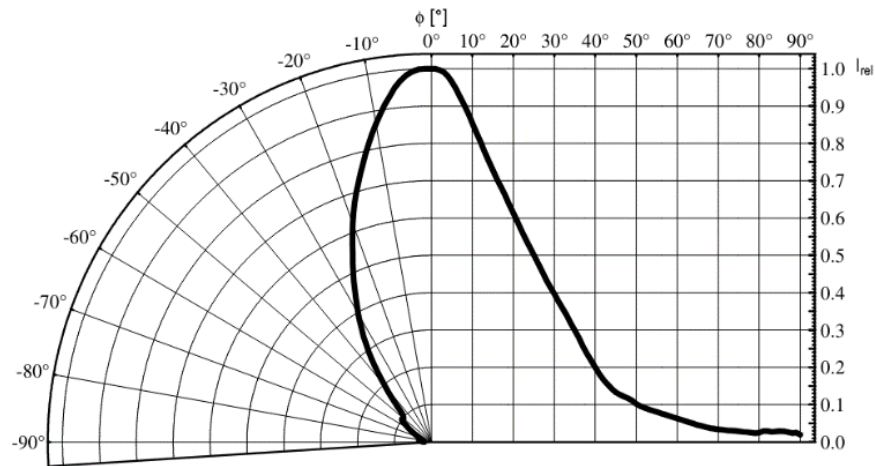


Figura 3.2. Características de radiación del led SFH 4728AS, figura obtenida de [68]

Tabla 3.2. Características de radiación del led SFH 4728AS

Ángulo (°)	Peso	Ángulo (°)	Peso	Ángulo (°)	Peso
0	1	35	0.300	70	0.033
5	0.960	40	0.200	75	0.030
10	0.860	45	0.130	80	0.027
15	0.720	50	0.100	85	0.030
20	0.615	55	0.080	90	0.020
25	0.495	60	0.062		
30	0.400	65	0.049		

3.1.2 Lente colimadora y lente convergente

Como propuesta para lente colimadora, fue escogida una lente esférica biconvexa. Esta lente fue diseñada desde cero debido a que no se encontraba dentro del catálogo actual de Zemax.

Las características de la lente seleccionada son la distancia focal de 11.6mm con un diámetro de 8mm . La lente seleccionada como lente colimadora se muestra en la figura 3.3.

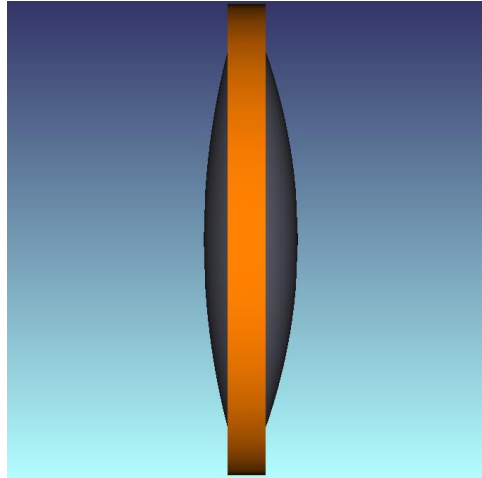


Figura 3.3. Lente biconvexa utilizada en el simulador Zemax, vista lateral

En el caso de la lente convergente fue elegido un lente de fresnel. Diseñada desde cero al igual que la lente pasada. Las características para esta lente son una distancia focal de 70mm con un diámetro de 102mm .

La lente seleccionada como lente convergente se muestra en la figura 3.4.



Figura 1.4. Lente paraxial utilizada en el simulador Zemax, vista frontal

Tomando en cuenta el espectro de emisión del led SFH 4728AS, se optó por el uso del material tipo PMMA, debido a que su ventana de transmisión para el infrarrojo se encuentra cercano al 90% y su accesibilidad de compra. En la figura 3.5 se muestra la ventana de transmisión para el PMMA.

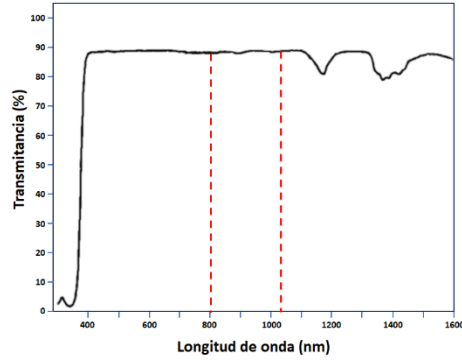


Figura 3.5. Ventana de transmisión del material PMMA en el infrarrojo [69]

3.1.3 Arreglo óptico y sus parámetros en Zemax

El arreglo óptico propuesto consta de un arreglo de fuentes de luz, un arreglo de lentes colimadoras siendo una lente por fuente de luz, y una lente paraxial.

La función de la fuente de luz es emitir el haz que, por el ángulo de apertura, llega a la lente paraxial divergente. La función de la lente paraxial es el coleccionar y colimar, guiando el haz hacia la última lente. Ésta, finalmente, concentra el haz en un punto. La variación de ésta permite cambiar el tamaño de la mancha de luz. Al final del arreglo óptico se encuentra colocado un detector, con la finalidad de obtener el tamaño, irradiancia y distribución de la mancha de luz.

El tipo de detector seleccionado fue rectangular, con un área de $100 \times 100 \text{ mm}$ de área y una resolución de 6000×6000 pixeles en los ejes X y Y.

En la figura 3.6 se muestra el arreglo óptico utilizado.

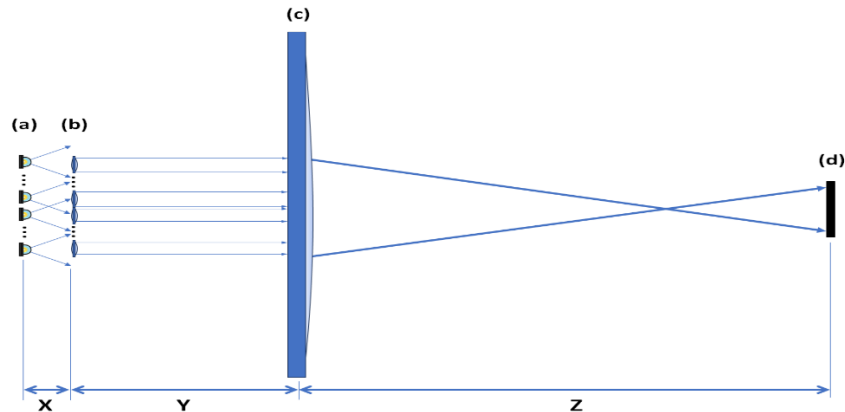


Figura 3.6. Arreglo básico para el sistema, (a) led ir, (b) lente colimadora, (c) lente de fresnel. (d) detector

Las distancias de separación entre cada elemento mencionado, que integran al arreglo, se basaron en las características presentadas de cada uno de los componentes. En la tabla 3.3 se muestran las distancias que fueron utilizadas como separación para el arreglo óptico.

Tabla 3.3. Distancias de separación entre elementos del arreglo óptico

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
11.6	70	140

Con el arreglo óptico integrado en el programa de Zemax, el siguiente paso es el análisis de trazo de rayos. Con un número de rayos simulados de 100, en la figura 3.7 puede observarse el funcionamiento de cada elemento, desde la parte superior hasta llegar al detector, en la parte inferior, siendo guiados la mayoría de los rayos emitidos.

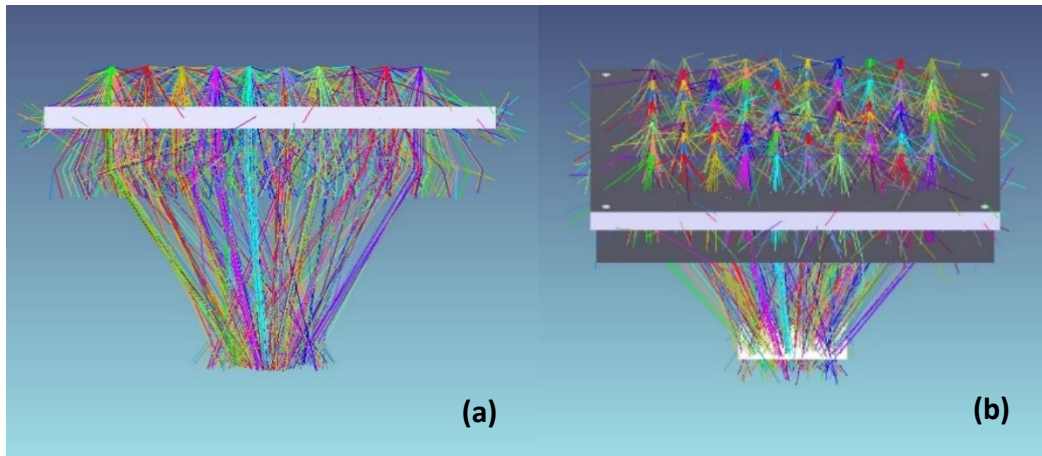


Figura 3.7. Trazo de rayos del arreglo óptico con matriz 10x10 generado en Zemax, (a) vista lateral, (b) vista superior a 50°

Los resultados obtenidos de las simulaciones hechas se muestran en la figura 3.8, donde se observa una mancha de luz con geometría cuadrada con un tamaño de 84x84 mm.

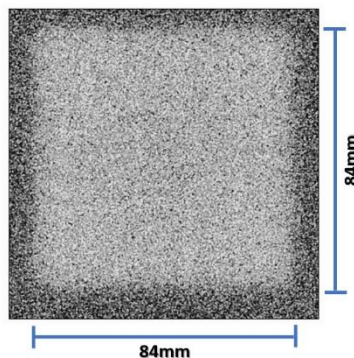


Figura 3.8. Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico con matriz de 10x10

El valor de irradiancia en la zona considerada como distribución uniforme es de 6300 mW/cm^2 .

3.1.4 Superficie y componente en Ansys

Para modelar la superficie, con ayuda de SolidWorks, se consideran las dimensiones de una PCI de 50x50 mm. En la figura 3.9 se muestra el plano de la superficie modelada.

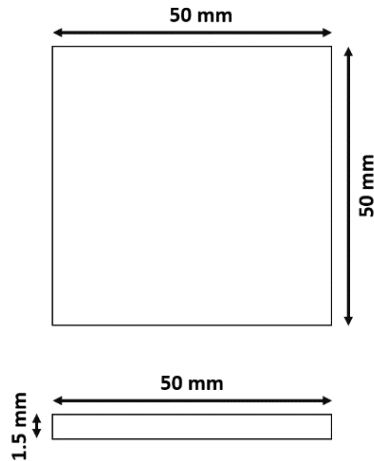


Figura 3.9. Plano de la superficie modelada en SolidWorks

El siguiente paso es integrar la pieza en el programa de Ansys en la sección de geometría y aplicar las características del material FR-4 Epoxy de la biblioteca de materiales. Las características físicas se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Propiedades físicas del FR-4 Epoxy

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1900	Kg/ m ³
Conductividad térmica isotrópica	0.294	W/ m °C
Calor específico	1150	J/ kg °C

Para modelar el componente, se consideran las dimensiones de un BGA de 27x27 mm. En la figura 3.10 se muestra el plano del componente modelado.

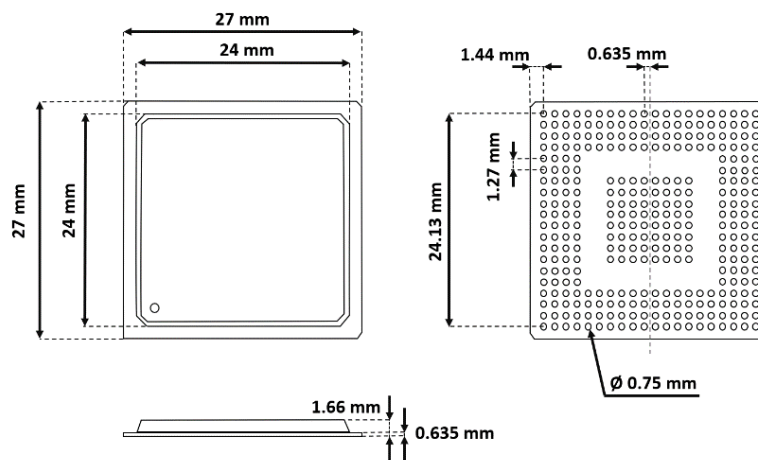


Figura 3.10. Plano del componente BGA modelado en SolidWorks

El siguiente paso para el componente es integrar la pieza en el programa de Ansys en la sección de geometría y aplicar las características del material FR-4 Epoxy para el cuerpo y las características del Cobre a todos los pads. Las características físicas del cobre se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Propiedades físicas del Cobre

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	8933	Kg/ m ³
Conductividad térmica isotrópica	400	W/ m °C
Calor específico	385	J/ kg °C

Finalmente, es necesario añadir una resolución para el estudio de los objetos aplicando un mallado a la geometría. La malla establecida para las simulaciones cuenta con 114,474 nodos y 50,044 elementos. En la figura 3.11 se muestra la pieza con las características mencionadas del mallado.

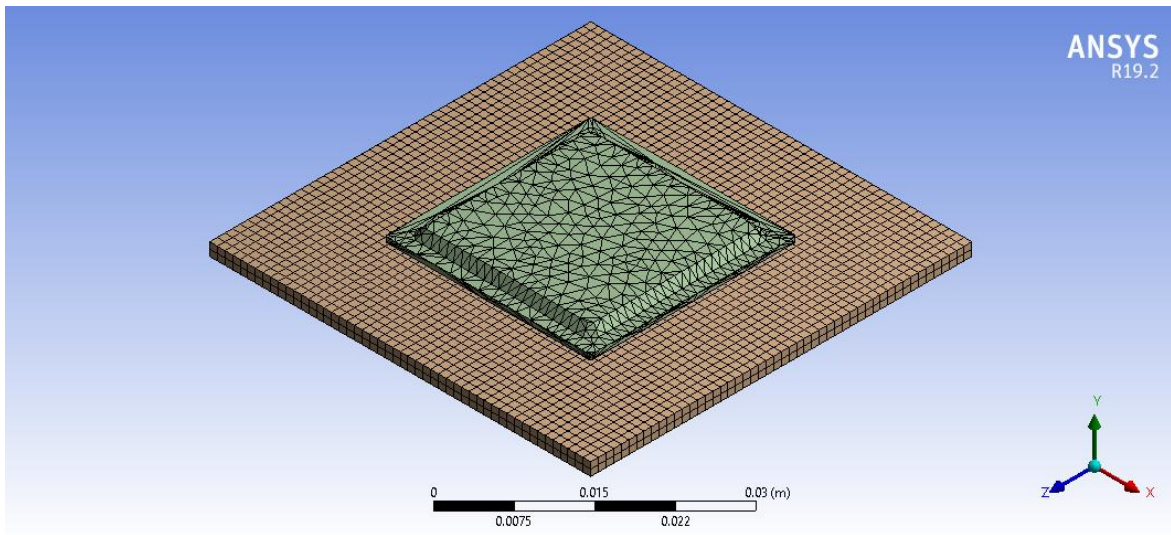


Figura 3.11. Mallado de figuras para el análisis de elementos finitos en Ansys

3.1.7 Análisis térmico transitorio y sus parámetros en Ansys

El análisis térmico propuesto está basado en la transferencia de calor, un fenómeno físico explicado en el capítulo 2. Consta de un flujo de calor radiado, radiación y convección. En los siguientes subcapítulos se trabajaron dos simulaciones. La primera simulación cuenta con condiciones ideales en estado estacionario, es decir, no es perturbado por ninguna variable además de la convección natural y las condiciones del sistema mismo. La segunda simulación cuenta con condiciones ideales para un proceso en masa, es decir, perturbado por una corriente de aire generada por el movimiento de la banda, además de las condiciones del sistema.

3.1.7.1 Condiciones de simulación en estado estacionario

El flujo de calor total aplicado es obtenido al multiplicar la irradiancia promedio de por el área de superficie, considerando una distribución completamente uniforme.

$$Q = Q_x \cdot A = 6.3 \text{ W/cm}^2 (7.29\text{cm}^2) = 45.927\text{W}$$

En la figura 3.12 se muestra la condición empleada en Ansys.

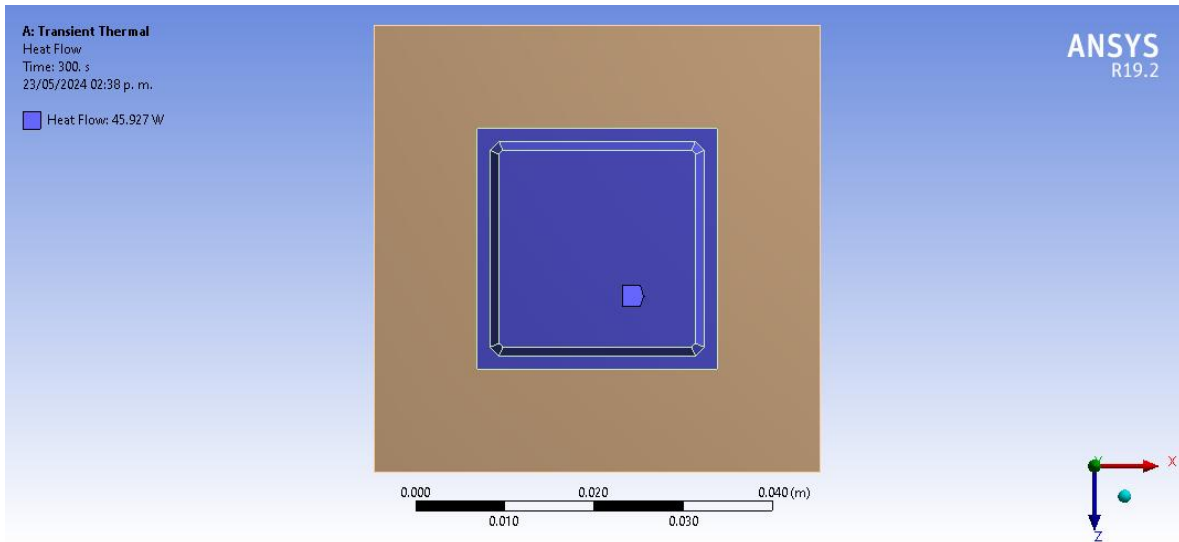


Figura 3.12. Aplicación de condición flujo de calor en Ansys

Por otra parte, al ser un objeto con temperaturas superiores a la temperatura ambiente, se convierte en una fuente emisora de radiación infrarroja y, por ende, obtiene pérdidas por convección libre.

Para el cálculo de coeficiente de convección (h) el componente, se considera una longitud del componente de 27mm (L), una temperatura superficial (T_s) de 250°C (temperatura máxima en los perfiles típicos de soldadura) y una temperatura de fluido (T_∞) de 25°C . El valor de temperatura de película (T_f) se obtiene de:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{250^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C}}{2} = 137.5^\circ\text{C}$$

Por el contrario, para el cálculo de h para la placa, se considera una longitud de la placa de 50mm (L), una temperatura superficial de 50°C (temperatura máxima alcanzada en la PCI) y una temperatura de fluido de 25°C . Para el valor de T_f se obtiene:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{50^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C}}{2} = 37.5^\circ\text{C}$$

En la tabla 3.6 se muestran otras propiedades del fluido, considerados para el componente y la placa.

Tabla 3.6. Propiedades del aire por temperatura de película

Parámetros	Temperatura de película ($^\circ\text{C}$)	Conductividad térmica del aire ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$)	Coefficiente de expansión térmica ($1/\text{K}$)	Viscosidad cinemática (m^2/s)	Prandtl
	T_f	k	β	ν	Pr
Componente	137.5	3.45×10^{-2}	$1/410.65$	2.77×10^{-5}	0.689
Placa	37.5	2.71×10^{-2}	$1/310.65$	1.7×10^{-5}	0.706

Cálculos para componente

Utilizando la ecuación 2.2 se calcula el número de Grashof (Gr):

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} = \frac{(9.81\text{m/s}^2)(1/410.65\text{K})(250^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})(0.027\text{m})^3}{(2.77 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s})^2} \approx 13.7883 \times 10^4$$

Ahora se calcula el número de Rayleigh (Ra) con la ecuación 2.3:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 13.7883 \times 10^4 (0.689) = 9.5001 \times 10^4$$

Se calcula el número de Nusselt (Nu) utilizando correlaciones empíricas para la convección natural, la ecuación de correlación de Churchill-Bernstein 2.4:

$$Nu = 0.54 \times Gr^{0.25} = 9.4804$$

Con lo anterior, es posible calcular h utilizando la ecuación 2.5:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{9.4804 \cdot 0.0345 \text{ W/mK}}{0.027\text{m}} = 12.1138 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Cálculos para placa

Se calcula el valor de Gr :

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} = \frac{(9.81\text{m/s}^2)(1/310.65 \text{ K})(50^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})(0.05\text{m})^3}{(1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2} \approx 34.1468 \times 10^4$$

Ahora se calcula el valor de Ra :

$$Ra = Gr \cdot Pr = 34.1468 \times 10^4 (0.706) = 24.1076 \times 10^4$$

Se calcula el número de Nu :

$$Nu = 0.54 \times Gr^{0.25} = 11.9655$$

Finalmente, se calcula h :

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{11.9655 \cdot 0.0271 \text{ W/mK}}{0.05\text{m}} = 6.4853 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En la figura 3.13 se muestra la condición empleada en Ansys de radiación y en la figura 3.14 se muestra la condición de convección con valores de coeficiente de $12.1138 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $6.4853 \text{ W/m}^2\text{K}$, para el componente y la placa respectivamente.

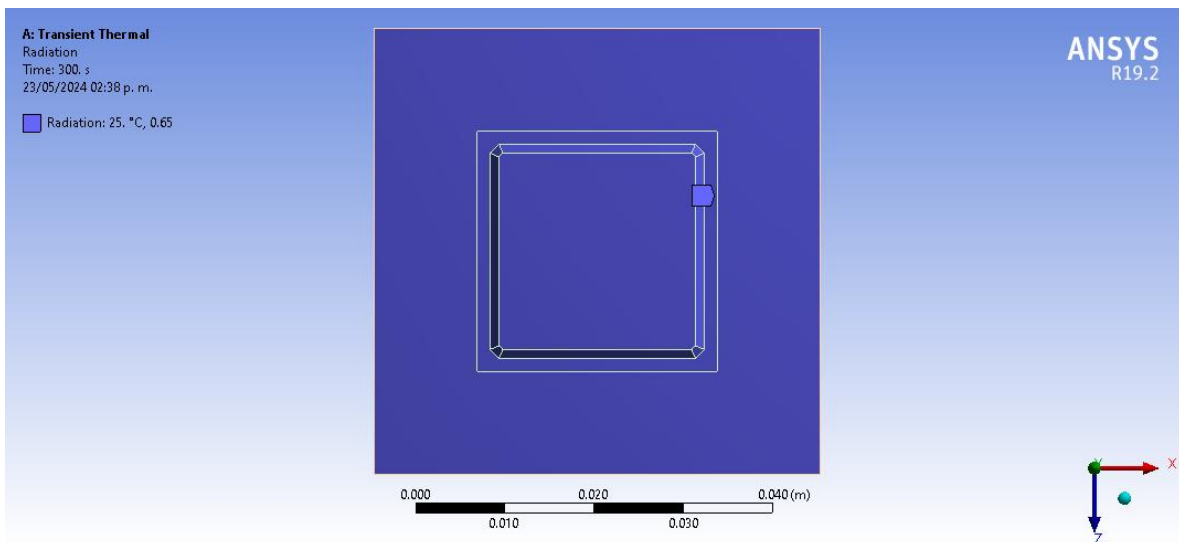


Figura 3.13. Aplicación de condición radiación en Ansys

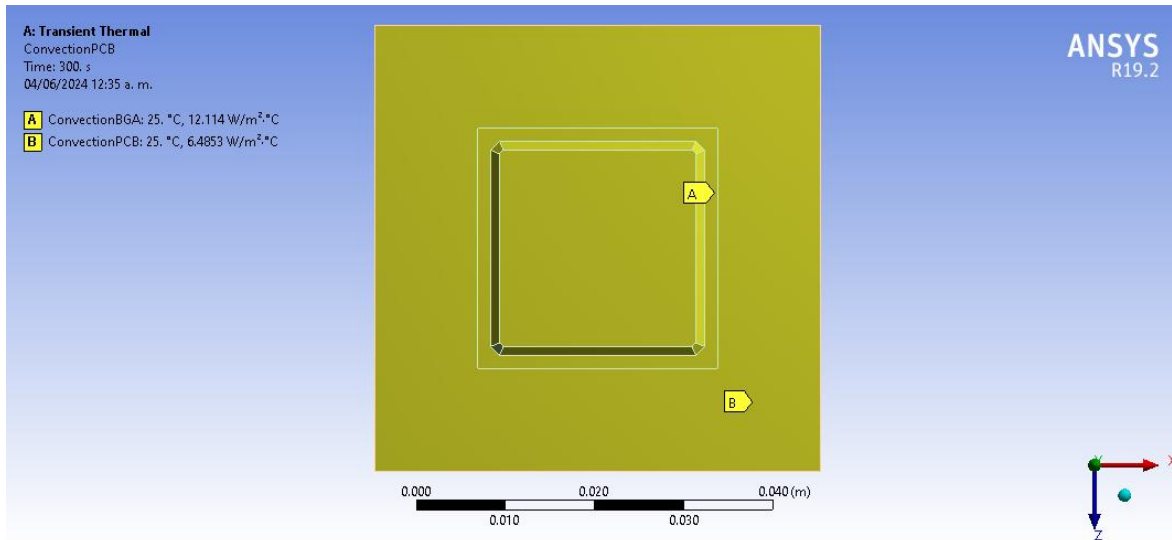


Figura 3.14. Aplicación de condición convección en Ansys

3.1.7.2 Condiciones de simulación para un proceso en masa

Las condiciones de flujo de calor y radiación son las mismas que en la sección anterior. La condición que cambia para esta simulación es la de convección.

Para el cálculo de coeficiente de convección (h) el componente, se considera una longitud del componente de 27mm , una temperatura superficial de 250°C , una temperatura de fluido de 25°C , una temperatura de película de 137.5°C y una velocidad de fluido (V_∞) de 0.3 m/s .

Por el contrario, para el cálculo de h para la placa, se considera una longitud de la placa de 50mm , una temperatura superficial de 50°C , una temperatura de fluido de 25°C , una temperatura de película de 37.5°C y una velocidad de fluido de 0.3 m/s .

En la tabla 3.6 se muestran otras propiedades del fluido, considerados para el componente y la placa por sus respectivas temperaturas de película.

Cálculos para componente

Utilizando la ecuación 2.6 se calcula el número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{V_\infty L}{\nu} = \frac{0.3\text{ m/s} (0.027\text{m})}{2.77 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}} = 292.4188$$

Se calcula el número de Nusselt utilizando correlaciones empíricas en relación al número de Reynolds y Prandtl 2.8. Para flujo laminar sobre una placa plana, la correlación común es:

$$Nu = 0.664 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3} = 10.0287$$

Con lo anterior, es posible calcular h utilizando la ecuación 2.5:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{10.0287 \cdot 0.0345\text{ W/mK}}{0.027\text{m}} = \boxed{12.814\text{ W/m}^2\text{K}}$$

Cálculos para placa

Se calcula el valor de Re :

$$Re = \frac{V L}{\nu} = \frac{0.3 \text{ m/s} (0.05\text{m})}{1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 882.3529$$

Se calcula el valor de Nu , para flujo laminar sobre una placa plana, la correlación común es:

$$Nu = 0.664 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3} = 17.5627$$

Finalmente, se calcula el valor de h :

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{17.5627 \cdot 0.0271 \text{ W/mK}}{0.05\text{m}} = 9.519 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En la figura 3.15 se muestra la condición de convección aplicada.

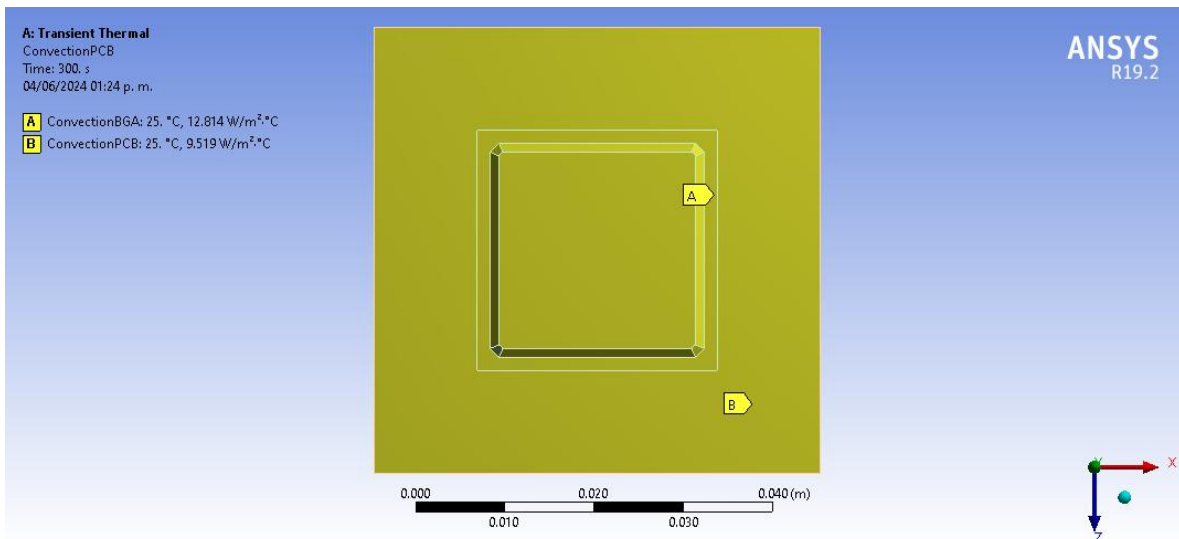


Figura 3.15. Aplicación de condición convección en Ansys

3.1.8 Solución de temperaturas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las soluciones.

En la figura 3.16 se muestran los resultados obtenidos de la simulación en estado estacionario. Obteniendo la distribución de temperaturas en el componente y la PCI; alcanzando temperaturas máximas de 692.51°C , ubicándose sobre el componente, y mínimas de 38.809°C , ubicándose sobre la placa.

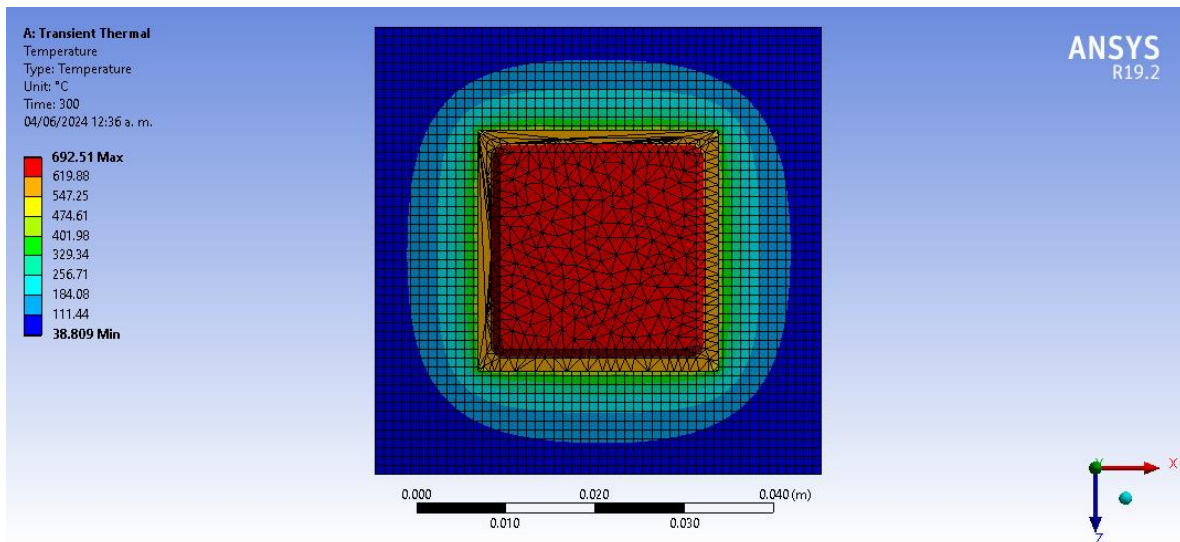


Figura 3.162. Resultado de simulación de convección libre para una exposición a 300 segundos

Por otra parte, en la figura 3.17, se muestran los resultados obtenidos de la simulación para proceso en masa. Obteniendo la distribución de temperaturas en el componente y la PCI; alcanzando temperaturas máximas de 685.59°C , ubicándose sobre el componente, y mínimas de 36.338°C , ubicándose sobre la placa.

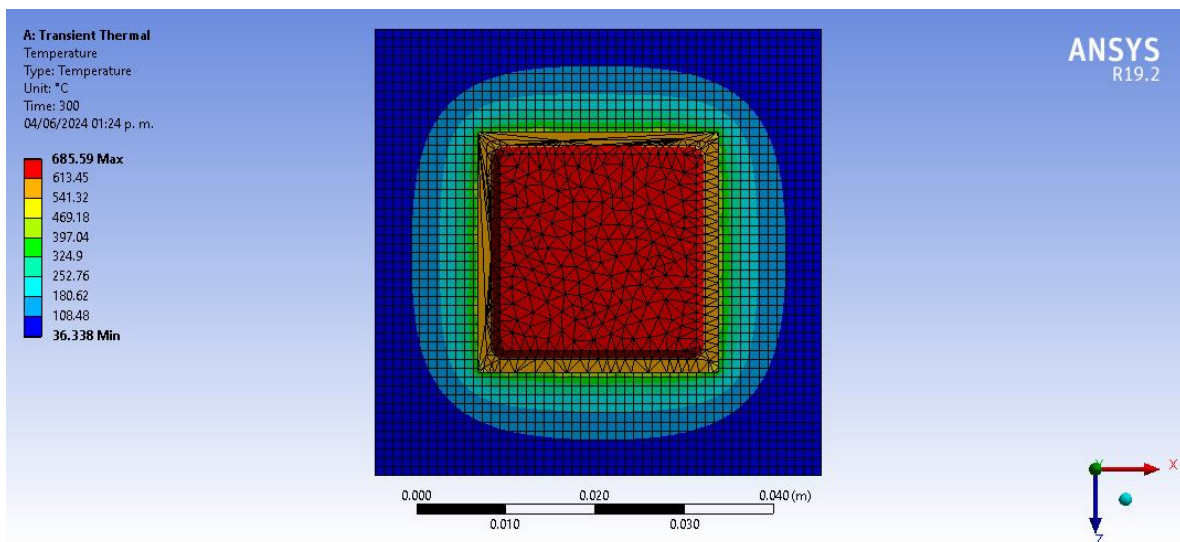


Figura 3.17. Resultado de simulación de convección forzada para una exposición a 300 segundos

3.2 Sistema escalado

Como sistema escalado se hace referencia a un sistema cuyas características no contribuyen a alcanzar las temperaturas necesarias para el proceso de soldado de componentes, sin embargo, su finalidad es el colaborar con un prototipo de un sistema que cuenta con características similares para poder llevar a cabo un análisis de fidelidad. Este sistema cuenta con una matriz de leds y lentes en una configuración 6x6.

Considerando que el sistema cuenta con el mismo tipo de lentes, con las mismas distancias, solo queda el describir el led infrarrojo utilizado para este prototipo.

3.2.1 Led infrarrojo

Para caracterizar el led, en el programa Zemax, los parámetros necesarios utilizados son obtenidos de la gráfica espectral de emisión y sus características específicas de radiación. La primera gráfica, mostrada en la figura 3.18, ayuda a localizar el rango espectral emitido dentro del espectro infrarrojo para los leds SFH 4718A con potencia de consumo eléctrico de $1000mW$, encontrado entre los $750nm$ a los $900nm$. En la tabla 3.1 son mostrados los pesos asignados de acuerdo a la gráfica mencionada anteriormente.

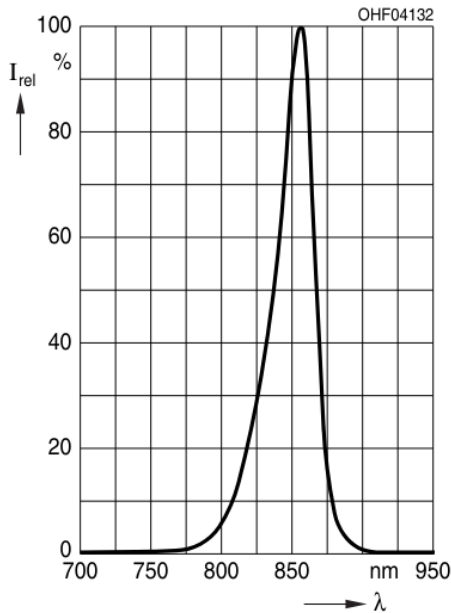


Figura 3.18. Emisión espectral relativa del led SFH 4718A, figura obtenida de [70]

Tabla 3.7. Espectro de emisión del led SFH 4718A

#	Longitud de onda (nm)	Peso
1	750	0
2	760	0.001
3	770	0.002
4	780	0.008
5	790	0.022
6	800	0.053
7	810	0.101
8	820	0.221
9	830	0.375
10	840	0.570
11	850	0.900
12	856	1
13	860	0.968
14	870	0.392
15	880	0.085
16	890	0.220
17	900	0.002

En el caso de la segunda gráfica, mostrada en la figura 3.19, se complementa el diseño añadiendo la característica de radiación en función del ángulo de apertura del lente del led. En la tabla 3.8 son mostrados los pesos asignados de acuerdo con la gráfica.

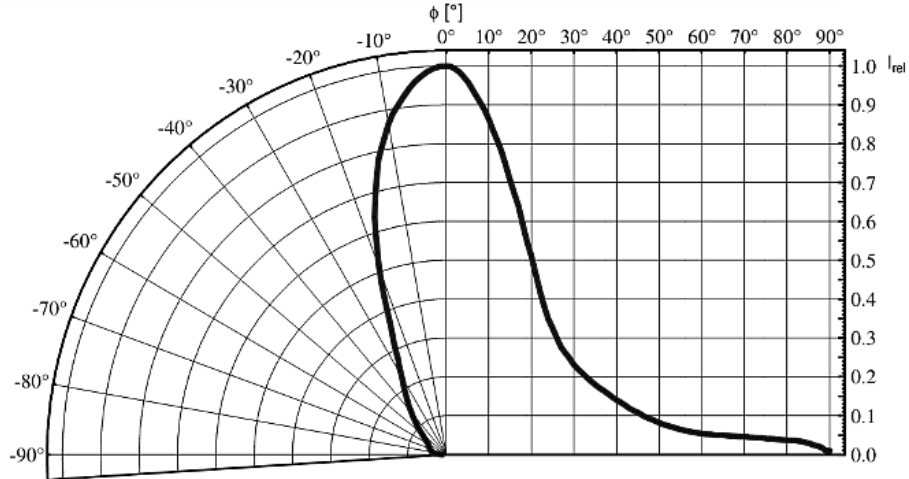


Figura 3.19. Características de radiación del led SFH 4718A, figura obtenida de [70]

Tabla 3.8. Características de radiación del led SFH 4718A

Ángulo (°)	Peso	Ángulo (°)	Peso	Ángulo (°)	Peso
0	1	35	0.180	70	0.045
5	0.960	40	0.140	75	0.042
10	0.863	45	0.109	80	0.040
15	0.710	50	0.080	85	0.030
20	0.510	55	0.062	90	0.010
25	0.328	60	0.052		
30	0.240	65	0.050		

3.2.2 Trazado de rayos Zemax

Integrado el arreglo óptico con matriz de 6x6 y sus leds correspondientes en el programa de Zemax, el siguiente paso es el análisis de trazo de rayos. Con un número de rayos simulados de 100, en la figura 3.20 puede observarse el funcionamiento de cada elemento, desde la parte superior hasta llegar al detector, en la parte inferior, siendo guiados la mayoría de los rayos emitidos.

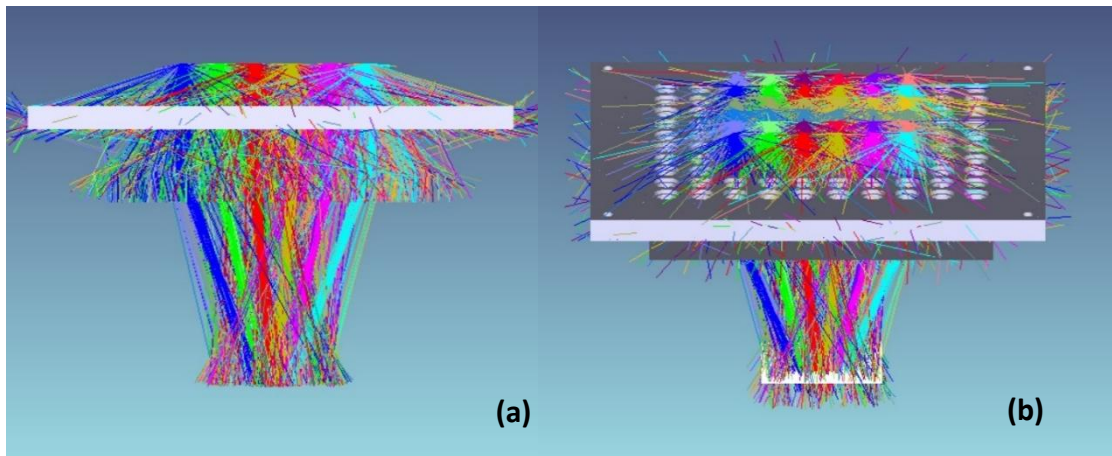


Figura 3.20. Trazo de rayos del arreglo óptico con matriz 6x6 generado en Zemax, (a) vista lateral, (b) vista lateral a 50°

3.2.3 Resultados de las simulaciones Zemax

Los resultados obtenidos de las simulaciones hechas para el arreglo óptico pueden dividirse en dos partes: tamaño de la mancha de luz, su distribución e irradiancia.

En la figura 3.21 se muestra la mancha de luz obtenida en el detector, a la salida del arreglo óptico con matriz de 6x6, con un tamaño de 20x20 mm.

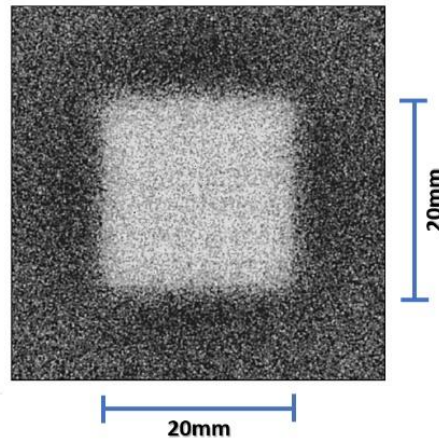


Figura 3.21. Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico con matriz de 6x6

El valor de irradiancia promedio en la zona considerada como distribución uniforme es de $1900mW/cm^2$. Recordando de igual forma que, como se mencionó en la sección anterior, se tienen pérdidas por los lentes.

3.2.4 Superficie Ansys

Para la superficie, se consideran las mismas piezas modeladas en las simulaciones previas.

Una vez integrada la pieza en el programa de Ansys en la sección de geometría y aplicado las características del material FR-4 Epoxy y Cobre de la biblioteca de materiales para cada pieza correspondiente, se añade una resolución para el estudio del objeto aplicando un mallado a la geometría. La malla establecida para las simulaciones cuenta con 114,474 nodos y 50,044 elementos. En la figura 3.22 se muestra la pieza con las características mencionadas del mallado.

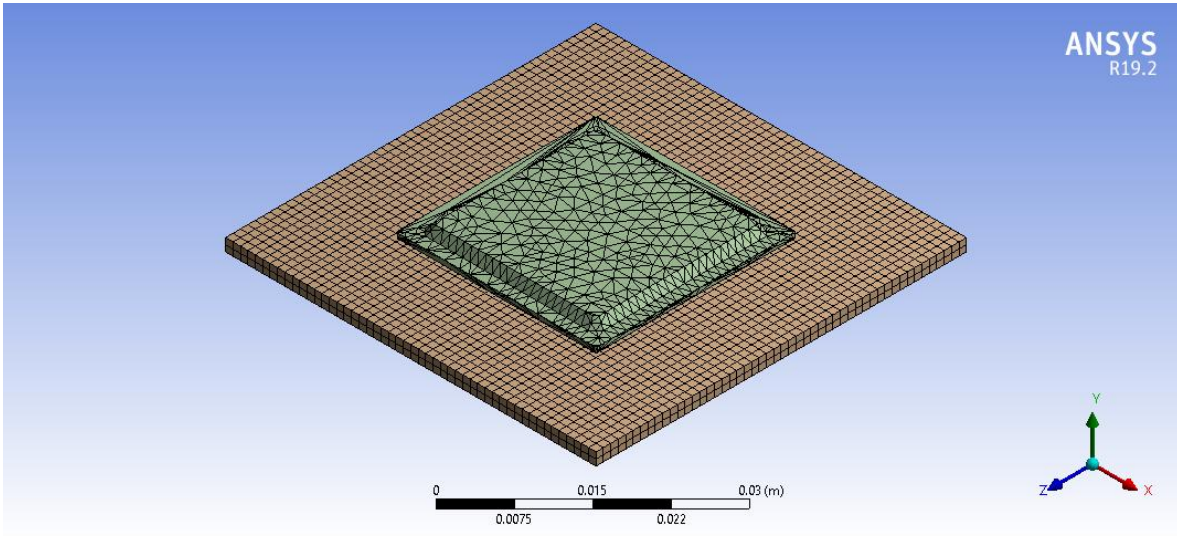


Figura 3.22. Mallado de figura para el análisis de elementos finitos en Ansys

3.2.5 Análisis térmico transitorio y sus parámetros en Ansys

El análisis térmico propuesto está basado en la transferencia de calor, un fenómeno físico explicado en el capítulo 2. Consta de un flujo de calor radiado, radiación y convección.

El flujo de calor aplicado es obtenido al multiplicar la irradiancia promedio por el área de superficie, considerando una distribución completamente uniforme.

$$Q = Q_x \cdot A = 1.9 \text{ W/cm}^2 (7.29 \text{ cm}^2) = 13.851 \text{ W}$$

En la figura 3.23 se muestra la condición empleada en Ansys.

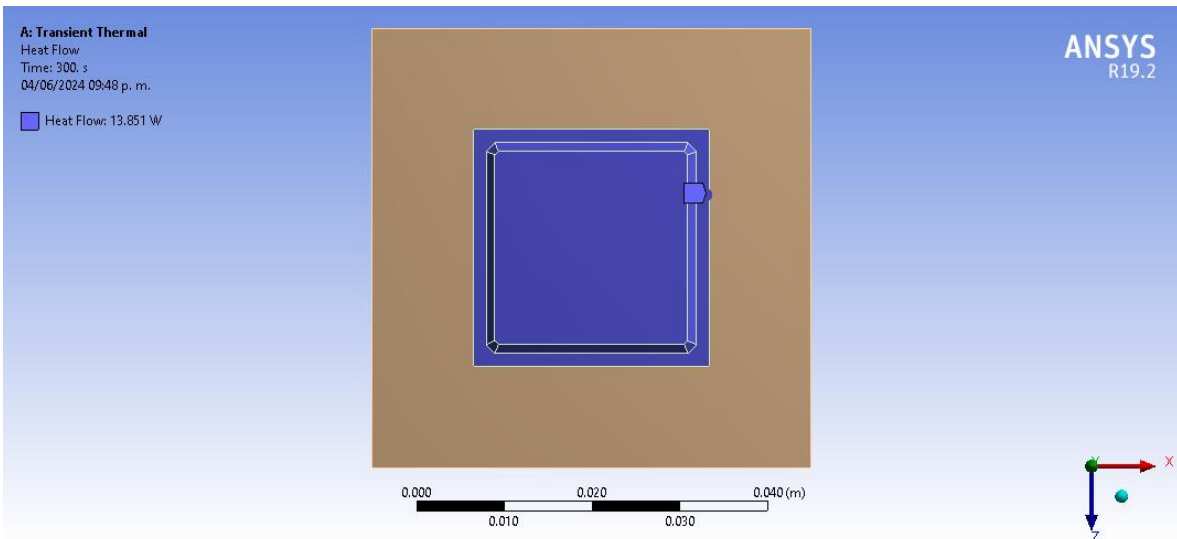


Figura 3. Aplicación de condición flujo de calor en Ansys

Por otra parte, en la figura 3.24 se muestra la condición empleada en Ansys de radiación.

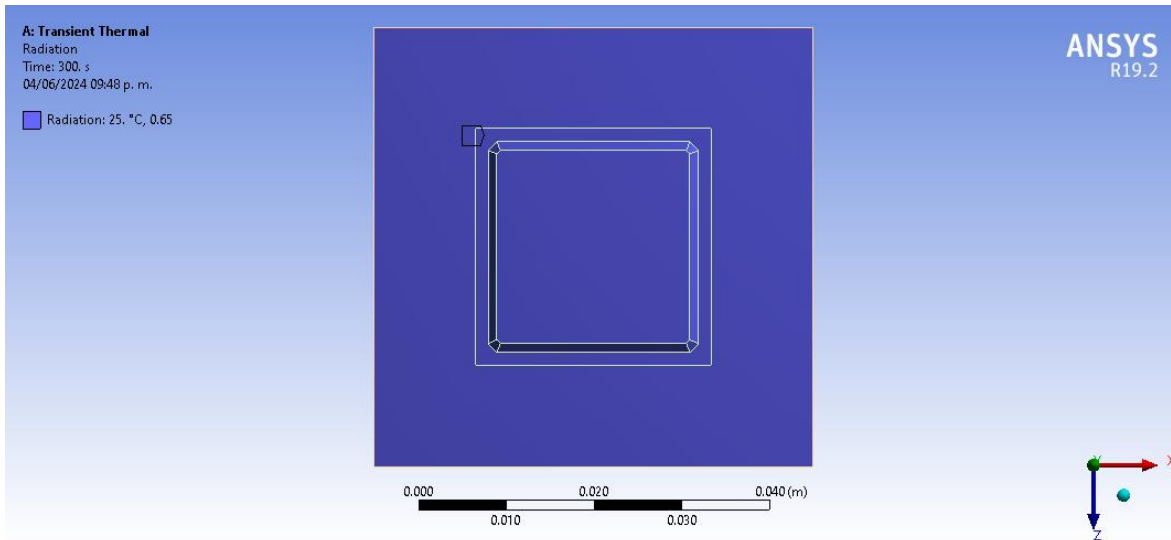


Figura 3.24. Aplicación de condición radiación en Ansys

Finalmente, para la condición de convección libre son calculados los coeficientes de convección.

Para el cálculo de coeficiente de convección (h) el componente, se considera una longitud del componente de 27mm (L), una temperatura superficial (T_s) de 125°C (temperatura estimada como máxima) y una temperatura de fluido (T_∞) de 25°C . El valor de temperatura de película (T_f) se obtiene de:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{125^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C}}{2} = 75^\circ\text{C}$$

Por el contrario, para el cálculo de h para la placa, se considera una longitud de la placa de 50mm (L), una temperatura superficial de 30°C (temperatura máxima alcanzada en la PCI) y una temperatura de fluido de 25°C . Para el valor de T_f se obtiene:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{30^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C}}{2} = 27.5^\circ\text{C}$$

En la tabla 3.9 se muestran otras propiedades del fluido, considerados para el componente y la placa.

Tabla 4.9. Propiedades del aire por temperatura de película

Parámetros	Temperatura de película ($^\circ\text{C}$)	Conductividad térmica del aire ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$)	Coefficiente de expansión térmica ($1/\text{K}$)	Viscosidad cinemática (m^2/s)	Prandtl
	T_f	k	β	ν	Pr
Componente	75	2.99×10^{-2}	1/348.15	2.07×10^{-5}	0.700
Placa	27.5	2.63×10^{-2}	1/300.65	1.6×10^{-5}	0.707

Cálculos para componente

Se calcula el valor de Gr :

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} = \frac{(9.81\text{m/s}^2)(1/298.15\text{K})(125^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})(0.027\text{m})^3}{(2.07 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s})^2} \approx 15.1142 \times 10^4$$

Ahora se calcula el valor de Ra :

$$Ra = Gr \cdot Pr = 15.1142 \times 10^4 (0.7) = 10.5799 \times 10^4$$

Se calcula el número de Nu :

$$Nu = 0.54 \times Gr^{0.25} = 9.739$$

Finalmente, se calcula h :

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{9.739 \cdot 0.0299 \text{ W/mK}}{0.027\text{m}} = 10.785 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Cálculos para placa

Se calcula el valor de Gr :

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} = \frac{(9.81\text{m/s}^2)(1/300.65 \text{ K})(30^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})(0.05\text{m})^3}{(1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2} \approx 7.9661 \times 10^4$$

Ahora se calcula el valor de Ra :

$$Ra = Gr \cdot Pr = 7.9661 \times 10^4 (0.707) = 5.6321 \times 10^4$$

Se calcula el número de Nu :

$$Nu = 0.54 \times Gr^{0.25} = 8.3188$$

Finalmente, se calcula h :

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{8.3188 \cdot 0.0263 \text{ W/mK}}{0.05\text{m}} = 4.3757 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En la figura 3.25 se muestra la condición de convección con valores de coeficiente de $10.785 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $4.3757 \text{ W/m}^2\text{K}$, para el componente y la placa respectivamente.

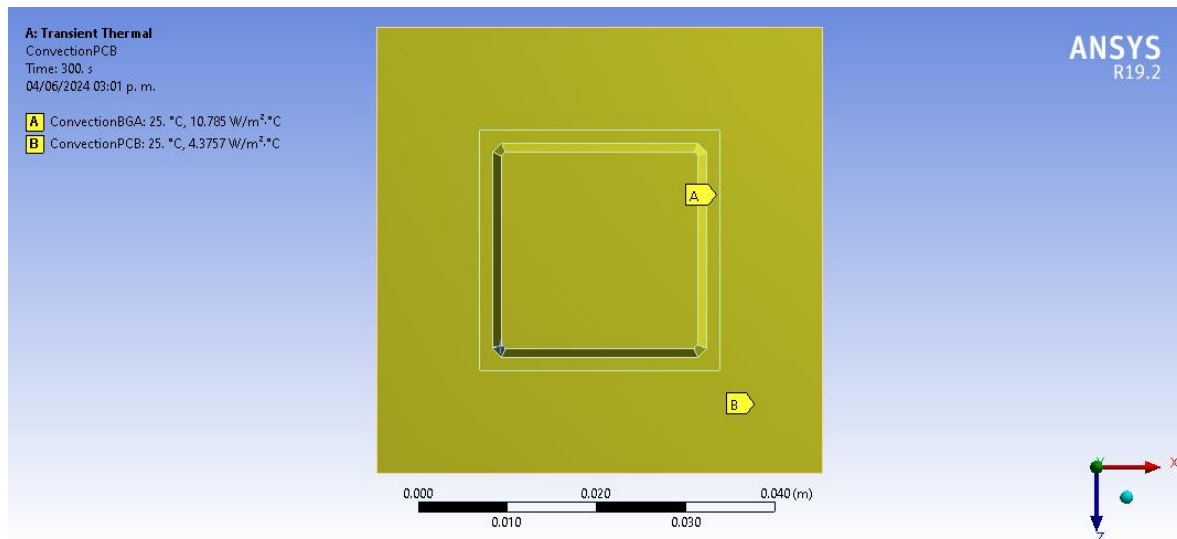


Figura 3.25. Aplicación de condición convección en Ansys

3.2.6 Solución de temperaturas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la simulación del experimento.

En la figura 3.26 se muestra la distribución de temperaturas en el componente y la PCI. Se alcanzan temperaturas máximas de 358.93°C , ubicándose sobre el componente, y mínimas de 29.568°C , ubicándose sobre la placa.

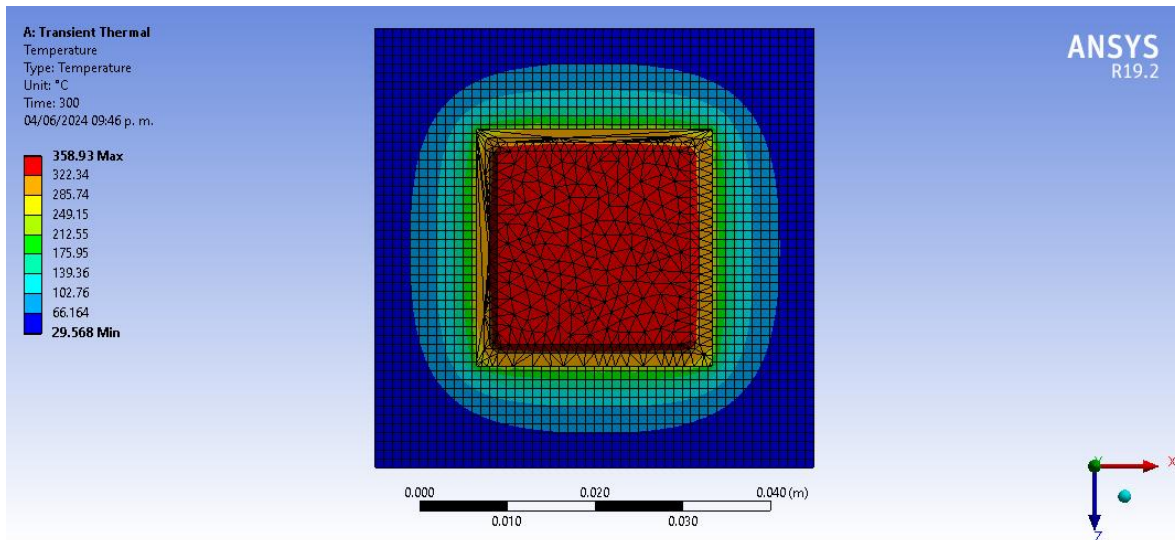


Figura 3.26. Resultado de simulación de convección libre para una exposición a 300 segundos

A continuación, con la finalidad de tener un panorama más completo de las propiedades se muestran simulaciones donde se varían algunas de las condiciones para evaluar la distribución de temperatura y los valores de temperatura alcanzados. Esto nos ayudará a tener una mayor conceptualización en el capítulo de experimentación y de análisis de resultados.

Otros valores de emisividad para el material FR-4 Epoxy se encuentran entre 0.65 hasta 0.95. En la figura 3.27 se aumentó el valor de emisividad al máximo mencionado.

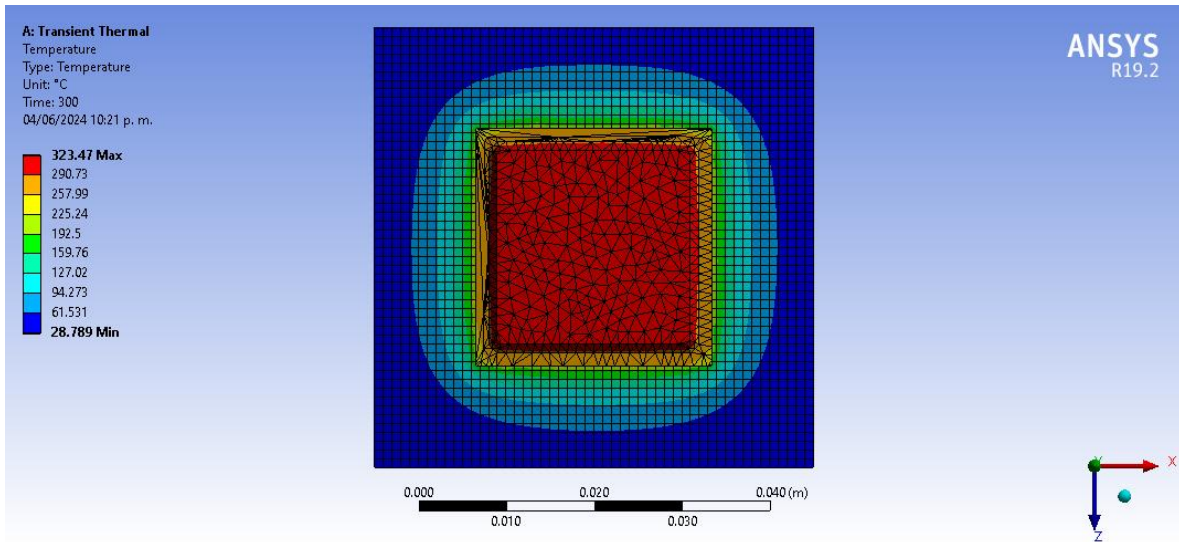


Figura 3.27. Resultado de simulación de convección libre para una exposición a 300 segundos con un valor de emisividad de 0.95

En la figura 3.28 se aumenta el coeficiente de convección, simulando con el máximo valor, considerando que los valores típicos para convección libre se encuentran entre $2 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

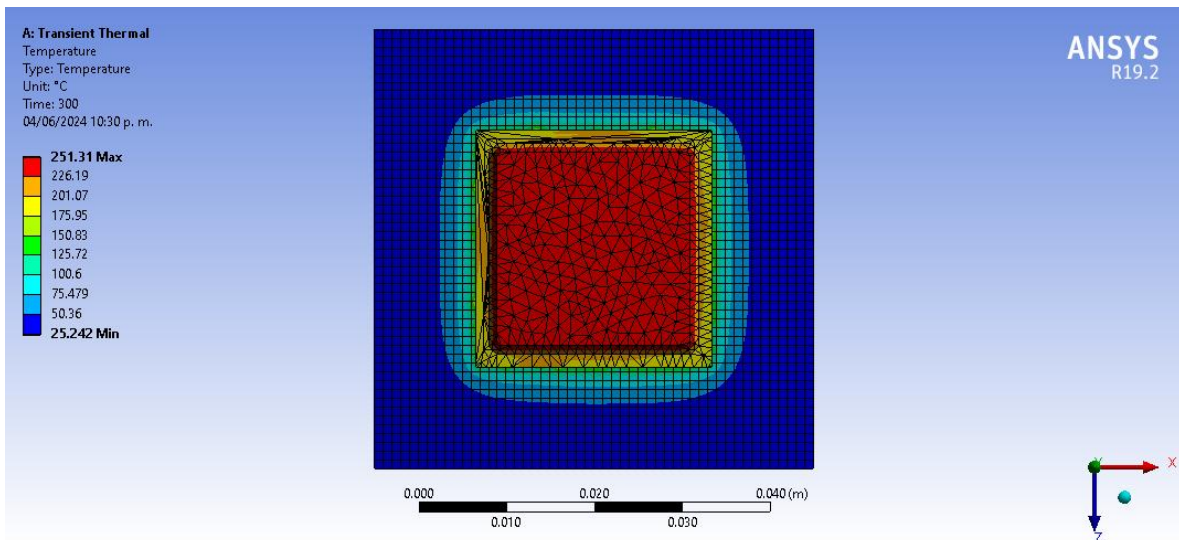


Figura 3.28. Resultado de simulación de convección libre para una exposición a 300 segundos con un coeficiente de convección de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$

En la figura 3.29 se muestra la distribución de temperaturas en el componente y la PCI, simulación obtenida con el valor mínimo de coeficiente de convección.

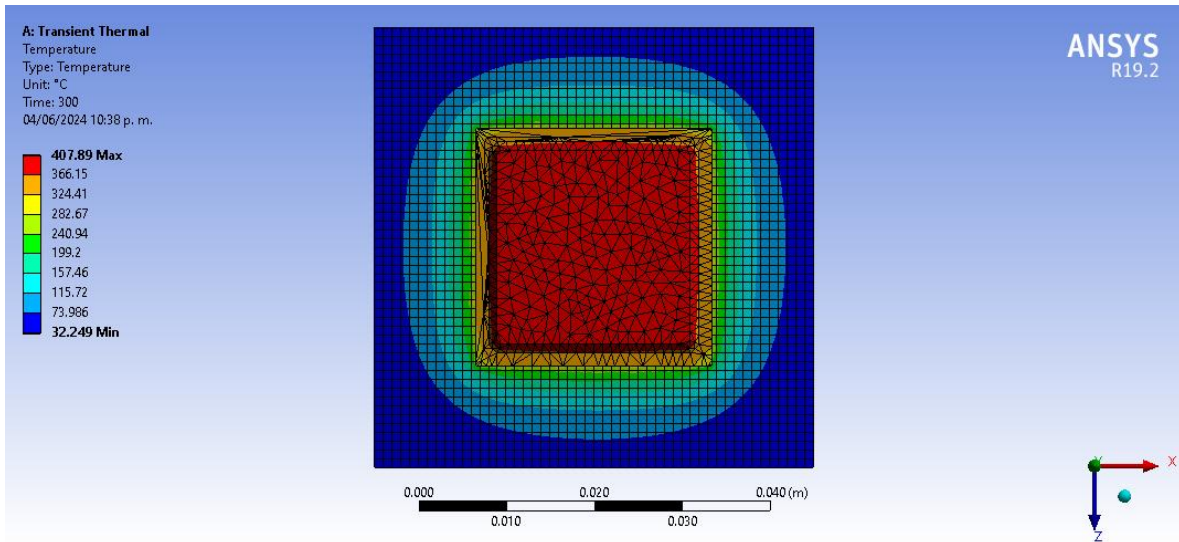


Figura 3.29. Resultado de simulación de convección libre para una exposición a 300 segundos con un coeficiente de convección de $2 \text{ W/m}^2\text{K}$

En la figura 3.30 se muestra la simulación con valores combinados, un coeficiente de convección de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un valor de emisividad de 0.95.

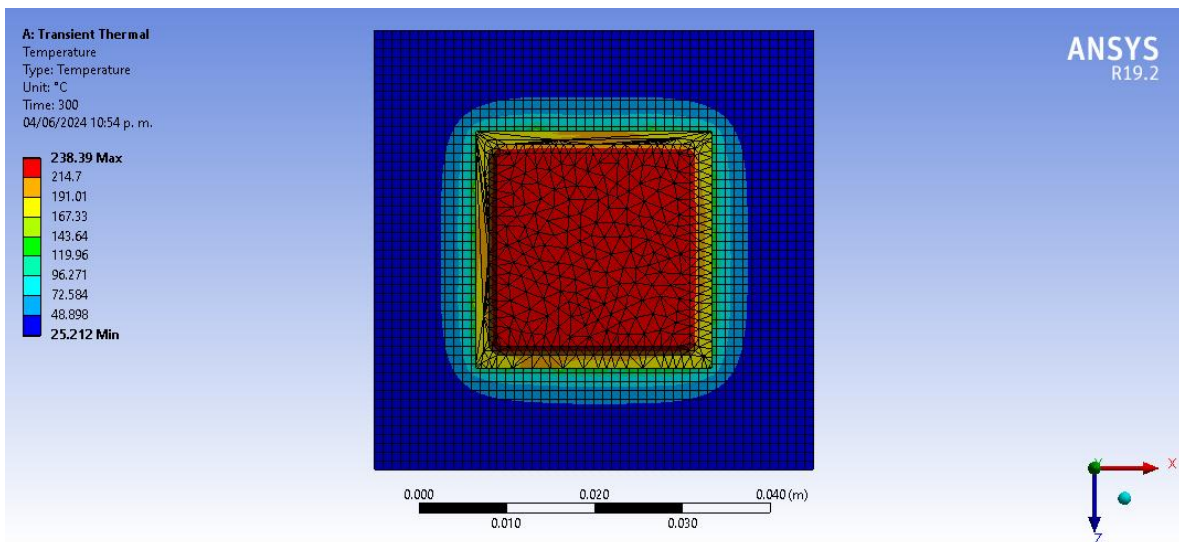


Figura 4. Resultado de simulación de convección libre para una exposición a 300 segundos con un coeficiente de convección de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ y valor de emisividad de 0.95

Por último, se realiza una simulación donde se desprecia el cobre, considerado para otro tipo de componentes que no cuentan con pads de cobre y donde el porcentaje de cobre por conexiones internas se encuentran por debajo del 5%. En la figura 3.31 se muestran los resultados obtenidos, considerando los valores de coeficiente de convección de $10.785 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $4.3757 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un valor de emisividad de 0.65.

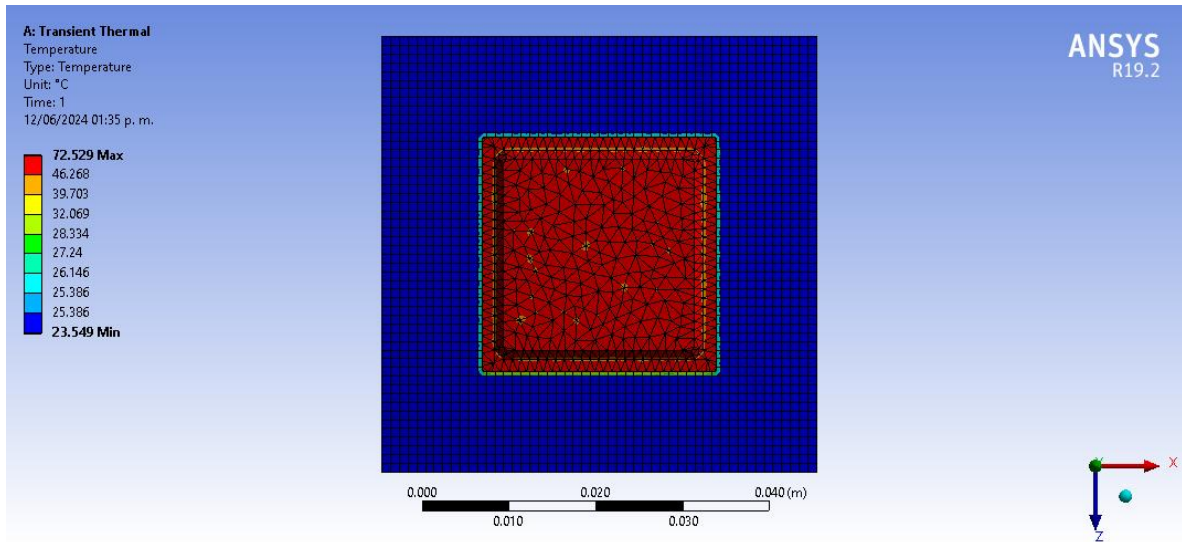


Figura 3.31. Resultado de simulación de convección libre para una exposición a 300 segundos con un coeficiente de convección de $10.785 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $4.3757 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un valor de emisividad de 0.65 en un componente con cobre despreciado

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Capítulo cuatro

En este capítulo se aborda el desarrollo de un prototipo específico y la subsecuente ejecución de pruebas experimentales detalladas, con el propósito de comparar los resultados obtenidos experimentalmente con aquellos datos obtenidos mediante simulaciones en conjunto con los parámetros considerados para ello.

La metodología adoptada proporciona una visión detallada del desarrollo de un prototipo, con arreglo matricial de leds y lentes de 6x6, desde su surgimiento y diseño hasta su prueba y experimentación. El objetivo es ofrecer una comprensión integral del proceso de desarrollo y validación de prototipos, enfatizando la importancia de las pruebas experimentales y la comparación con los resultados simulados para después lograr diseños robustos y eficaces.

LabVIEW es un programa de software desarrollado por National Instruments, diseñado específicamente para la adquisición de datos, control de instrumentos y la automatización industrial. Utiliza un enfoque gráfico para la programación, conocido como lenguaje G, que facilita la creación de aplicaciones mediante diagramas de bloques. Además, los usuarios pueden diseñar interfaces interactivas con controles e indicadores para la visualización y manipulación de datos en tiempo real.

Para la adquisición de datos, procesamiento y análisis de señales y automatización, LabVIEW se integra fácilmente con una amplia variedad de dispositivos, incluyendo una extensa colección de funciones para configurar, controlar y recopilar datos de hardware, así como funciones matemáticas y de análisis que facilitan su manipulación. Además, éste puede integrarse con lenguajes de programación tradicionales como C, C+ y Python.

Las aplicaciones de este programa son automatización de pruebas y mediciones, así como el control de instrumentos, siendo una excelente herramienta para el ámbito académico y de investigación facilitando el desarrollo y validación de prototipos. Por ello, LabVIEW fue seleccionado para el desarrollo de pruebas, adquisición de datos de las mediciones y para control del circuito de potencia.

4.1 Partes del prototipo

En la figura 4.1 se muestra una fotografía tomada del prototipo, en ella se destacan los componentes que integran el sistema.

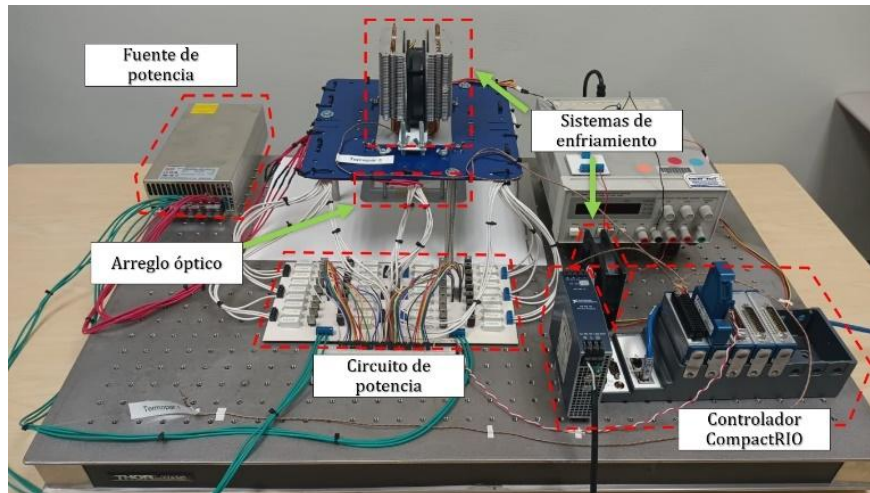


Figura 4.1. Fotografía del prototipo

Iniciando de izquierda a derecha, la fuente de potencia es la encargada de suministrar la energía necesaria, de manera constante y fiable, para el funcionamiento del sistema. En este caso, se utiliza una fuente de potencia Mean Well SE-600-5, la cual proporciona un voltaje de salida de $5V_{cd}$ y una corriente nominal de $100A$.

El siguiente conjunto es el arreglo óptico, como se puede apreciar en la figura 4.2.

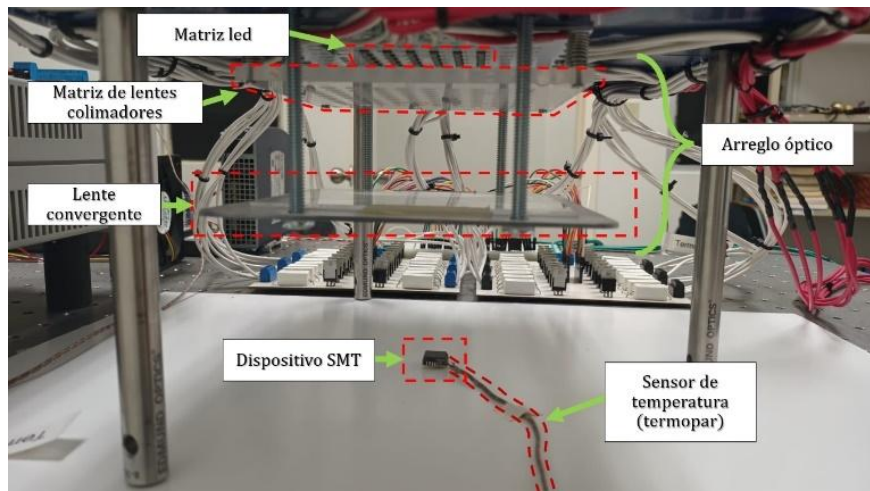


Figura 4.2. Fotografía del arreglo óptico del prototipo

El arreglo óptico incluye un conjunto de 36 leds infrarrojos, modelo SFH 4718A de la marca OSRAM. Cada led tiene una potencia óptica de $665mW$, un voltaje directo de $1.75V$ y un ángulo de apertura de 40° . Montados sobre una placa de circuito impreso de aluminio, para mayor disipación de calor debido a que los leds trabajarán con una potencia de consumo eléctrico de $1000mW$, cuentan con una separación en X y Y de $10mm$ entre led y led.

Seguido del conjunto de leds, se encuentra un arreglo matricial de 36 lentes biconvexas individuales de PMMA sin película antirreflejante, modelo LPP0812 de la marca Knight Optical. Cada lente cuenta con $8mm$ de diámetro, $6.5mm$ de apertura y una distancia focal de $11.6mm$, además, se encuentran alineadas axialmente con su correspondiente led infrarrojo. Estos lentes se encuentran montados

sobre una base de PMMA con dimensiones de $134 \times 132 \times 6 \text{ mm}$. La función de este arreglo matricial de lentes biconvexas es coleccionar los haces emitidos por los leds y colimarlos.

El siguiente elemento es un lente de fresnel, modelo LFG70102 de la marca Knight Optical, con un diámetro de 102 mm y una distancia focal de 70 mm , su material de PMMA tampoco cuenta con película antirreflejante. Esta lente es la responsable de concentrar los haces en un punto específico.

Por último, a una distancia de 140 mm se encuentra el dispositivo SMT, cuyo material es de FR-4 epoxy con dimensiones de 20 mm y no cuenta con almohadillas de cobre.

Continuando con los elementos que conforman el prototipo encontramos el circuito de potencia. El diseño electrónico propuesto, considerando una operación segura con su máxima corriente admisible de 1000 mA , consta de:

- Terminales para alta corriente, cuyo propósito es conectar los leds desde su placa donde se encuentran montados hasta el resto del circuito.
- Una resistencia, cuya finalidad es proteger el led contra daños de corrientes altas limitando la caída de voltaje que pasa a través del mismo. Optando por el uso de resistores tipo "cement fixed" de $0.33 \Omega 5 \text{ W}$, utilizados para proporcionar una mayor estabilidad trabajando con potencias y temperaturas altas.
- Un mosfet IRFZ44N, cuya función es la de un interruptor electrónico. Seleccionado por su gran manejo de corrientes y tensiones y su rápida respuesta transitoria, siendo ideal para controlar cargas de alta potencia en sistemas de alimentación.

En la figura 4.3 se muestra el diagrama de conexión del circuito de potencia mencionado.

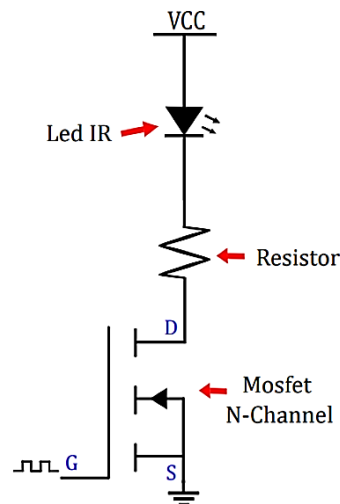


Figura 4.3. Diagrama de conexión para cada led infrarrojo

El siguiente componente del prototipo es el sistema de enfriamiento, éste consta de dos partes: enfriamiento de la PCI de la matriz de leds y enfriamiento de la placa de circuito de potencia. El primer sistema cuenta con dos elementos, una tubería de calor, cuya propiedad es disipar calor por medio de sus tuberías de cobre selladas que se encuentran rellenas de un líquido térmico con propiedades específicas, alrededor del cuerpo de las tuberías mencionadas se encuentran en contacto directo unas aletas metálicas que, en conjunto con un ventilador, de 12 Vcd 0.3 A con dimensiones de $80 \times 80 \times 25 \text{ mm}$ de la marca MARTECH modelo DF0802512SEHN, extraen el calor de

la superficie con la que están en contacto y lo disipan al ambiente. El otro sistema cuya finalidad es disipar el calor generado por los mosfets de la placa de circuito de potencia, consta simplemente de un ventilador igual al anterior mencionado.

Por último, fueron utilizados elementos de control donde se encuentra el módulo NI cRIO-9074 junto con las tarjetas NI 9213 para lectura de datos, la tarjeta NI 9401 para la generación de las señales *PWM* y su respectiva fuente, así como termopares tipo K y una computadora con el programa de LabVIEW. En la tabla 4.1 se muestran las características del termopar utilizado para las mediciones.

Tabla 5. Características del termopar utilizado

Modelo	240-080
Rango	-73°C a 482°C
Resolución	41.276 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Termopar	Tipo K

4.2 Lazo abierto

Abordando la primera prueba con un control de lazo abierto, el objetivo principal de este experimento es comparar los resultados obtenidos experimentalmente con aquellos generados mediante simulación.

Para realizar esta comparación, se implementa una señal tipo escalón como entrada al sistema de lazo abierto. Esta señal, que representa el valor de *PWM* enviado a la tarjeta de potencia, es una herramienta fundamental en la teoría de control, ya que permite observar la respuesta transitoria y la estabilidad del sistema. Estudiando la respuesta a partir del punto en que se estabiliza, se obtienen datos clave del comportamiento dinámico y su capacidad de alcanzar un estado de equilibrio.

En la figura 4.4 se muestra el diagrama de conexión para el prototipo en lazo abierto, donde se pueden observar las componentes mencionadas en la sección anterior.

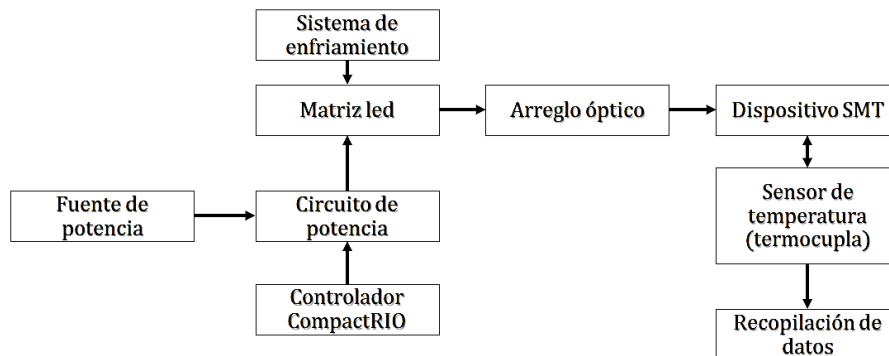


Figura 4.4. Diagrama de conexión del prototipo lazo abierto

Considerando las condiciones de la simulación desarrollada en Ansys, figura 3.31, donde se contempla el uso de la matriz de leds 6x6 a su máxima potencia, la señal equivalente de entrada al sistema para este primer experimento del prototipo consta de un valor de *PWM* del 100%. Por medio de LabVIEW y su colaboración con CompactRIO es posible controlar el valor de *PWM* con ayuda de un programa simple donde la entrada de este programa es la temperatura deseada y la salida envía el voltaje necesario para que la tarjeta de potencia active los leds de acuerdo a las necesidades.

Para comenzar con los experimentos fue necesario contar con gafas protectoras, debido a que la emisión de los leds utilizados se encuentra en longitudes de onda infrarrojas, así como ubicarse en un cuarto cerrado y oscuro.

Los resultados obtenidos de los experimentos fueron analizados y divididos en dos secciones: temperatura y tamaño de mancha de luz.

Las temperaturas obtenidas fueron capturadas experimentalmente con un termopar, ubicado en el centro de la superficie del dispositivo. En la figura 4.5 se muestra la gráfica de temperaturas obtenidas del sistema, en donde se puede observar el comportamiento general del arreglo óptico sobre un componente que se encuentra en un estado estable, perturbado por la convección natural y pérdidas mínimas por radiación y conducción.

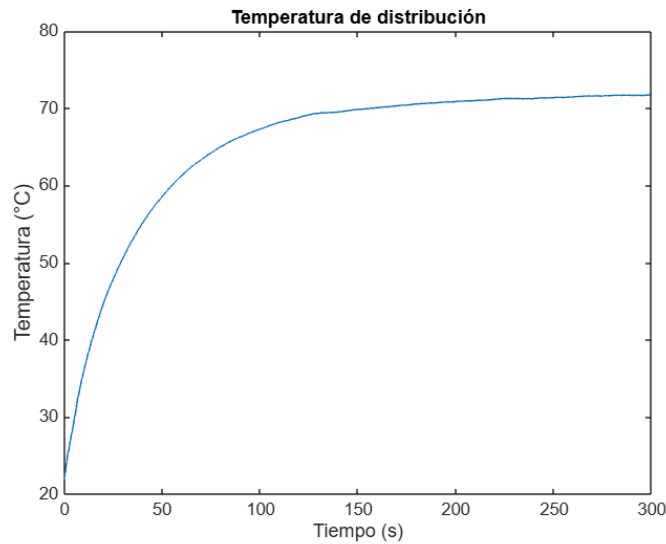


Figura 4.5. Respuesta experimental del sistema a lazo abierto

Con la finalidad de obtener el tamaño de la mancha de luz, fue colocado un material resistente a temperaturas de color blanco mate para poder visualizar la salida del arreglo óptico y, con ayuda de una regla, fueron obtenidas las medidas de la mancha de luz. En la figura 4.6 se muestra la distribución de la mancha abarcando un área de $20 \times 20 \text{ mm}$.

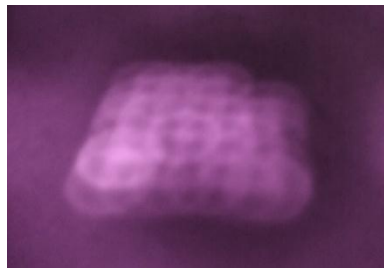


Figura 4.6. Imagen capturada de la mancha de luz

4.3 Lazo cerrado

4.3.1 Motivación

Si bien, el sistema de control de lazo abierto nos permitió conocer la temperatura máxima a alcanzar con el prototipo, el objetivo de todo sistema de soldadura o calentamiento es el alcanzar y variar la temperatura a valores deseados. Para esto es necesario desarrollar un control de lazo cerrado, esta transición mejorará la precisión y la estabilidad del sistema, podrá adaptarse a condiciones cambiantes de acuerdo a las necesidades, optimizará el desempeño y, para el caso de soldadura de componentes electrónicos, es útil para el control de sistemas no lineales, como lo es un perfil de temperatura.

4.3.2 Aplicación de un control PI

Para aplicar un control PI de manera efectiva, es esencial conocer en detalle el sistema a controlar y entender los principios del control PI. Para ello la figura 4.7 muestra el diagrama de conexión para el prototipo a lazo cerrado, necesario para el control PI.

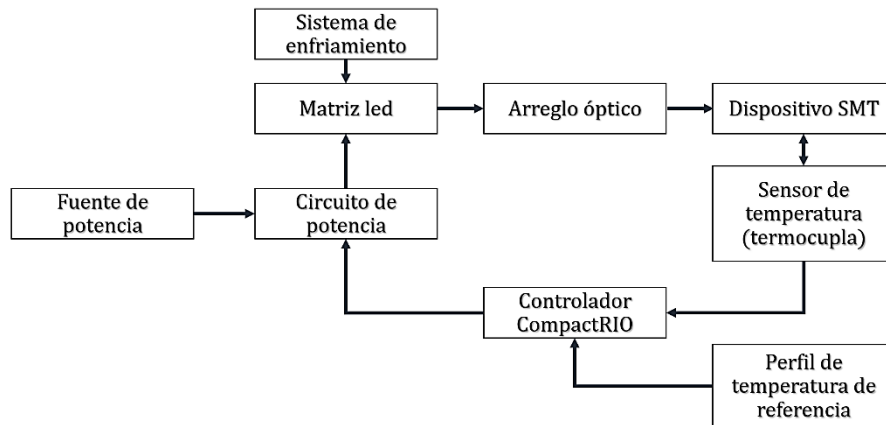


Figura 4.7. Diagrama de conexión del prototipo en lazo cerrado

Utilizando el entorno de desarrollo gráfico de LabVIEW se implementó un control PI, donde se configuró el panel frontal para poder realizar ajustes de los parámetros K_p y K_i , además de poder ingresar los valores escalados de un perfil de temperatura deseado, permitiendo el monitoreo en tiempo real y ajustes dinámicos del control. Esta implementación nos fue de utilidad para poder iterar múltiples veces el sistema para las pruebas experimentales, encontrando valores que mejoraron la estabilidad y precisión del sistema, ajustándose a los valores del perfil deseado.

Los valores para K_p y K_i que mejoraron la precisión del sistema fueron de 33 y 2, respectivamente. En la figura 4.8, la gráfica “medición de temperatura $T(t)$ ” muestra el seguimiento de un perfil de reflujo escalado, donde la línea roja representa al perfil y la azul a la respuesta medida del sistema. La gráfica “Señal de control $u(t)$ ” por otra parte, muestra el comportamiento de la señal.

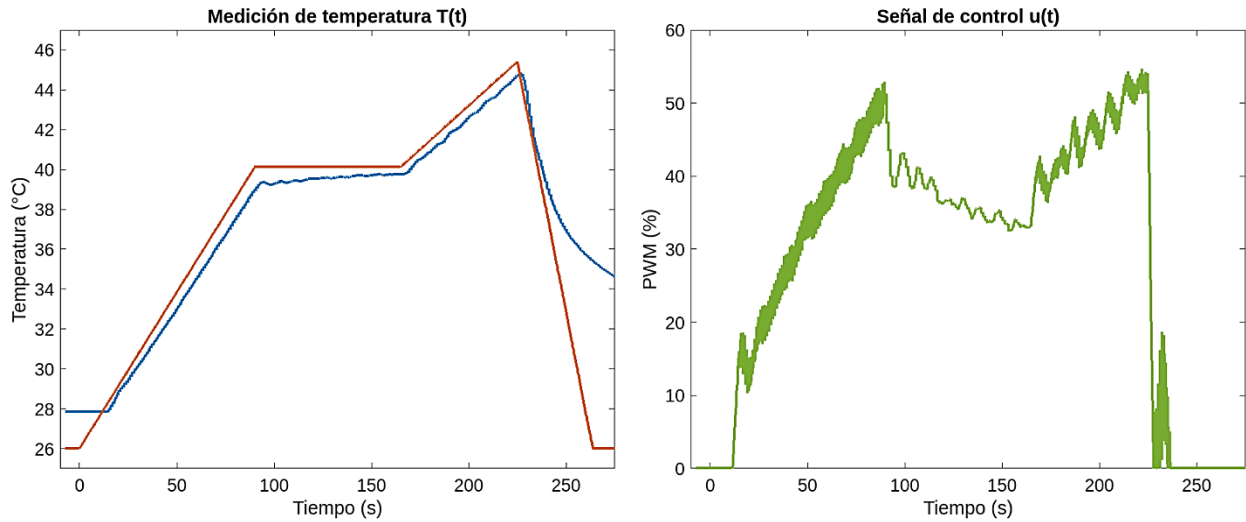


Figura 4.8 Respuesta experimental del sistema ante un control PI con K_p de 33 y K_i de 2

4.3.3 Aplicación de un control PI pre-compensado

Para proponer un algoritmo de control más robusto se requiere de un modelo aproximado donde se relacione la salida con la entrada de la planta, en este caso la entrada del sistema es la señal PWM aplicada al circuito de potencia, y la salida del sistema es la temperatura que se desea controlar. Para obtener el modelo dinámico del sistema se realizaron experimentos aplicando señales de entrada, tipo escalón, de 50%, 80% y 100% de la señal *PWM*, en un control de lazo abierto. La figura 4.9 muestra los comportamientos de temperatura correspondientes en color azul, rojo y negro, respectivamente.

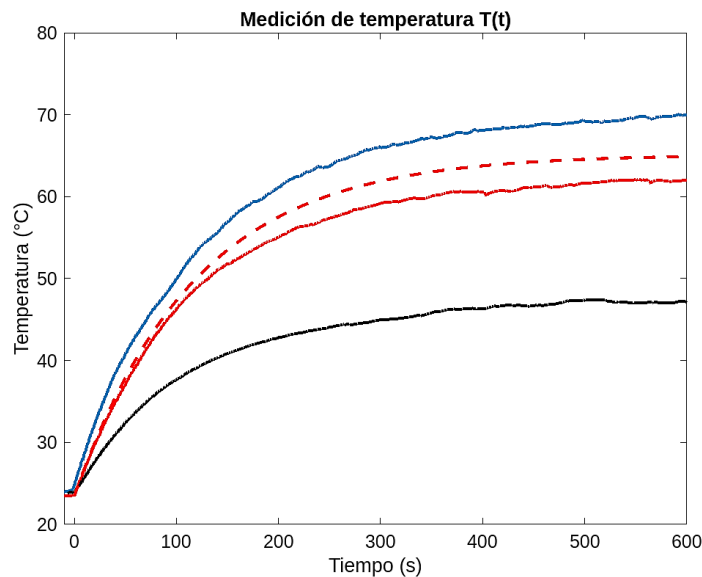


Figura 4.9. Respuesta experimental del sistema ante diferentes valores de entrada en un control de lazo abierto

Se puede observar que las respuestas corresponden a un sistema de primer orden, por lo que el modelo se obtiene midiendo el valor final y la constante de tiempo para cada entrada y promediando los resultados, obteniendo el modelo:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -0.008482 T(t) + 0.006909 u(t)$$

Donde $T(t)$ es la temperatura en el componente a soldar y $u(t)$ es la entrada de control.

En la figura 4.9 se muestra además con línea interrumpida de color rojo el comportamiento del modelo identificado cuando se le aplica una entrada del 80%. Si bien el modelo tiene un comportamiento cercano con la línea sólida roja, existen variaciones.

Definiendo el modelo dinámico de la planta como un sistema de primer orden con la forma:

$$\dot{T}(t) = -aT(t) + bu(t) + \gamma(T(t), t)$$

Donde $\gamma(T(t), t)$ es una perturbación debido a dinámicas no modeladas y perturbaciones externas y a y b son constantes.

Siendo objetivo de control el diseñar una señal de control $u(t)$ de modo que la temperatura $T(t)$ siga a una señal de referencia $T_{ref}(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (T(t) - T_{ref}(t)) = 0$$

Se define la variable de error $e(t) = T(t) - T_{ref}(t)$, cuya dinámica está dada por:

$$\dot{e}(t) = -ae(t) + bu(t) + aT_{ref}(t) + \dot{T}_{ref}(t) + \gamma(T(t), t) \quad (4.1)$$

Se propone un controlador dinámico con la forma:

$$u = \frac{1}{b} \left(-k_1 r - aT_{ref}(t) + \dot{T}_{ref}(t) - k_2 \omega(t) \right), \quad (4.2)$$

$$\dot{\omega}(t) = e(t)$$

Sustituyendo (4.2) en (4.1) se obtiene:

$$\dot{e}(t) = -(a + k_1)e(t) + \gamma(T(t), t) - k_2 \omega(t) \quad (4.3)$$

Para demostrar la estabilidad de un equilibrio $(\bar{e}, \bar{\omega}) = (0, \omega_0)$ del sistema en lazo cerrado, considere el sistema nominal:

$$\dot{e}(t) = -(a + k_1)e(t) - k_2 \omega(t)$$

Este sistema tiene origen como punto de equilibrio exponencialmente estable con una adecuada elección de constantes k_1 y k_2 .

Si en el sistema perturbado (4.3), la perturbación $\gamma(\cdot)$ es una constante γ_0 , el punto de equilibrio es:

$$(\bar{e}, \bar{\omega}) = \left(0, \frac{\gamma_0}{k_2} \right) \quad (4.4)$$

Y este equilibrio seguirá siendo exponencialmente estable lo que supone que el $\omega(t)$ converja a otro valor finito. Por último, si la perturbación fuese una función variante en el tiempo, se aplicaría el teorema sobre estabilidad para sistemas perturbados, explicado en [71], concluyendo que la solución permanecerá cercana al equilibrio (4.4).

Realizando el experimento con ganancias de $K_p = 0.22$ y $K_i = 0.06$, la gráfica “medición de temperatura $T(t)$ ” de la figura 4.10 nos muestra la respuesta del sistema con el control propuesto. Por otra parte, en la gráfica “señal de control $u(t)$ ” se puede observar que la señal de control no sobrepasa el 80% en ningún momento del experimento.

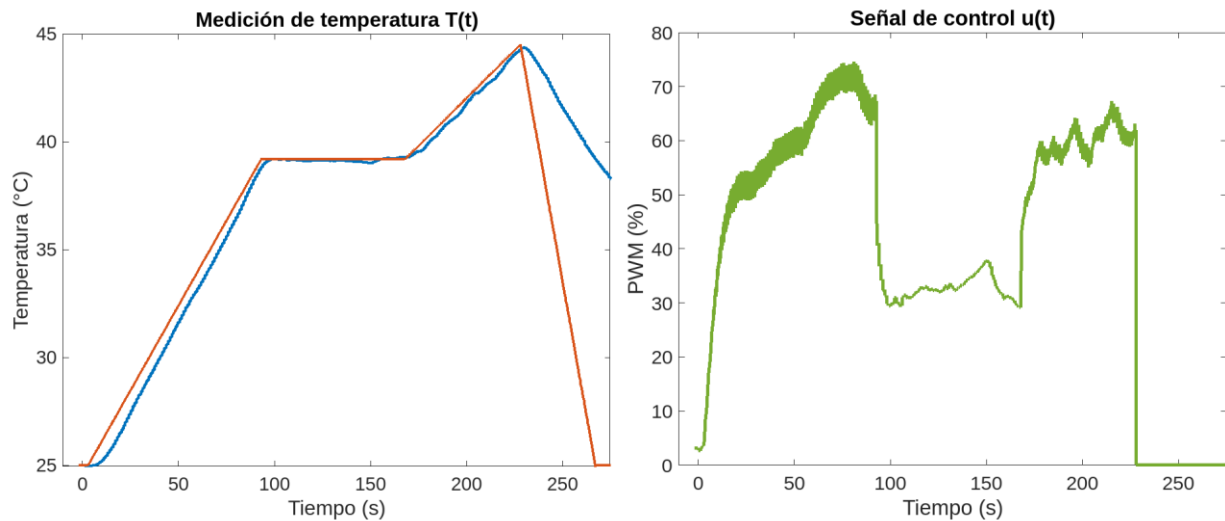


Figura 4.10. Respuesta experimental del sistema ante un control PI pre-compensado con K_p de 0.22 y K_i de 0.06

Con la finalidad de corroborar la distribución en el componente, se realizó otra corrida del experimento con control PI pre-compensado. Para este experimento se colocaron termopares en cada esquina del componente, como se muestra en la figura 4.11.

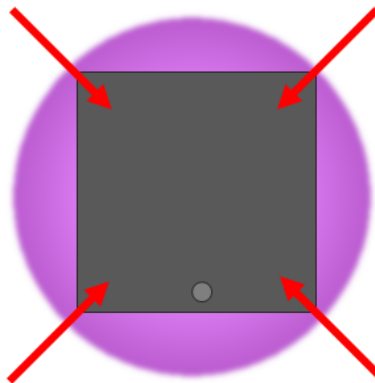


Figura 4.11. Esquema de colocación de termopares en el componente para prueba de distribución

La figura 4.12 muestra una gráfica con los resultados de las temperaturas medidas y su comportamiento durante todo el proceso, donde la línea roja corresponde a la señal de referencia.

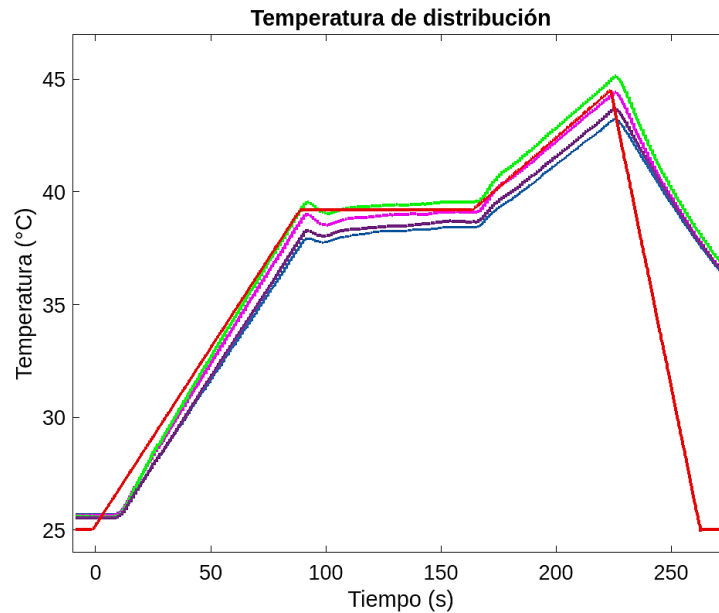


Figura 4.12. Gráfica de mediciones tomadas en diferentes partes del dispositivo calentado con el prototipo

4.4 Propuesta de mejora

En la etapa de pruebas experimentales se realizó también una prueba donde se proponía una mejora al prototipo y, por ende, al sistema en general: Confinamiento de área de medición.

El confinamiento puede mejorar significativamente la eficiencia del calentamiento en procesos industriales, como lo es el proceso de soldadura de componentes electrónicos. Las investigaciones, como en [72], han demostrado que el confinamiento de la zona de calentamiento puede reducir significativamente la energía necesaria para el calentamiento en comparación con los entornos de calentamiento abiertos. Esto debido a que el espacio confinado permite una mejor transferencia de calor y minimiza la pérdida de calor al entorno.

En la figura 4.13 se muestran las caras a cubrir para lograr un confinamiento completo. Para este experimento fueron utilizadas placas de aluminio con cara pulida en dirección al componente a calentar, esto con la finalidad de aprovechar los rayos que se pierden en el arreglo óptico.

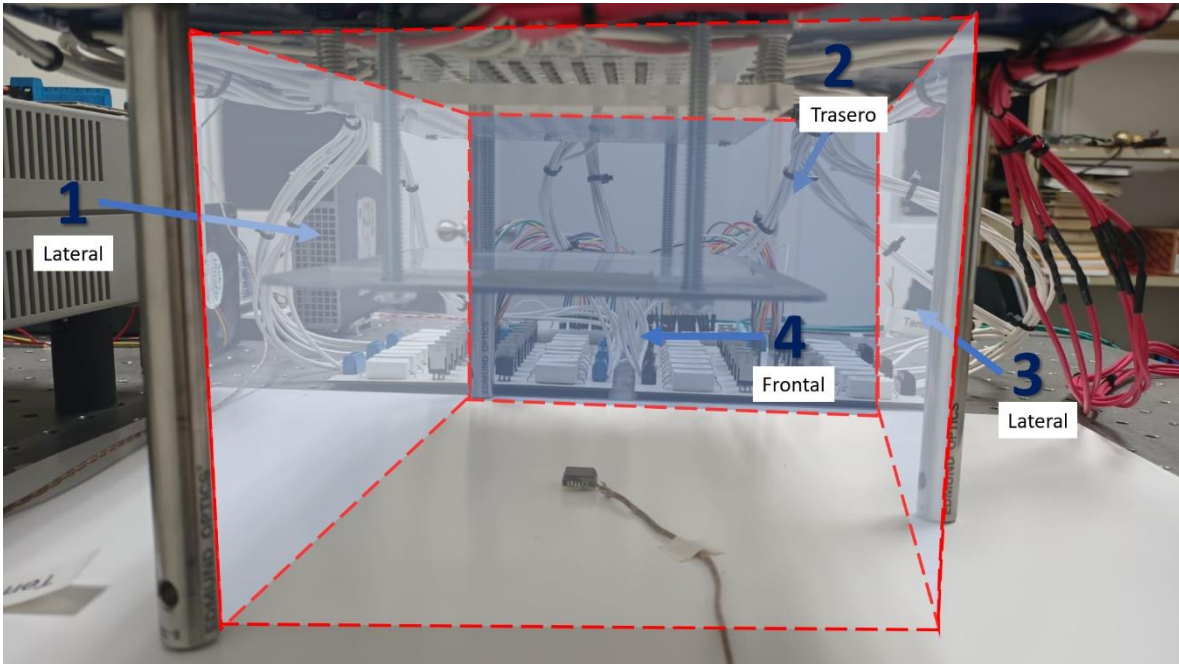


Figura 4.13. Referencia de áreas para lograr el confinamiento

En la figura 4.14 se muestra la gráfica de temperaturas obtenidas en el sistema en estado estable con confinamiento, en donde se puede observar el comportamiento general del arreglo óptico sobre un componente. Alcanzando temperaturas de 91.77°C, superiores a las temperaturas alcanzadas en la sección 4.2.

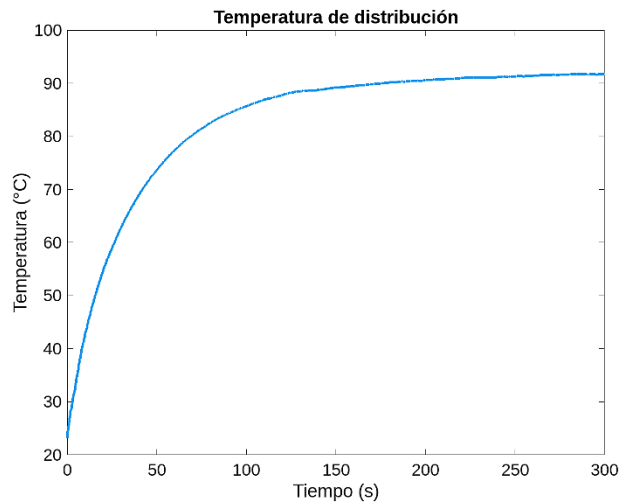


Figura 4.14. Gráfica de mediciones tomadas en el dispositivo calentado con el prototipo con la configuración de confinamiento

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Capítulo cinco

En este capítulo se compararán y analizarán los resultados obtenidos en las simulaciones para las configuraciones con matrices de 10x10, así como también se analizarán las simulaciones de la configuración 6x6 y se compararán con los resultados experimentales obtenidos del prototipo construido. El objetivo es analizar las situaciones establecidas, evaluar la precisión del modelo de simulación y extraer conclusiones relevantes para futuros desarrollos.

Los resultados obtenidos fueron analizados y divididos en 2 secciones:

1. Simulaciones en Zemax
2. Estado estacionario versus Proceso en masa
3. Simulación versus Prueba experimental
4. Análisis de control del perfil de reflujos
5. Impacto de variación de valores en simulaciones Ansys

5.1 Simulaciones en Zemax

5.1.1 Trazado de rayos

En la figura 5.1 se muestra el trazado de rayos del arreglo óptico realizado en el programa de Zemax. Las pérdidas de rayos que se observan en la figura se deben a que el ángulo de apertura del led infrarrojo es mayor que el tamaño de la lente colimadora, lo que hace que solo se tenga control de los rayos que entran al lente; además, existen pérdidas debido a que las lentes utilizadas no cuentan con películas antirreflectoras, teniendo el fenómeno de reflexión, como se menciona en el capítulo 2.

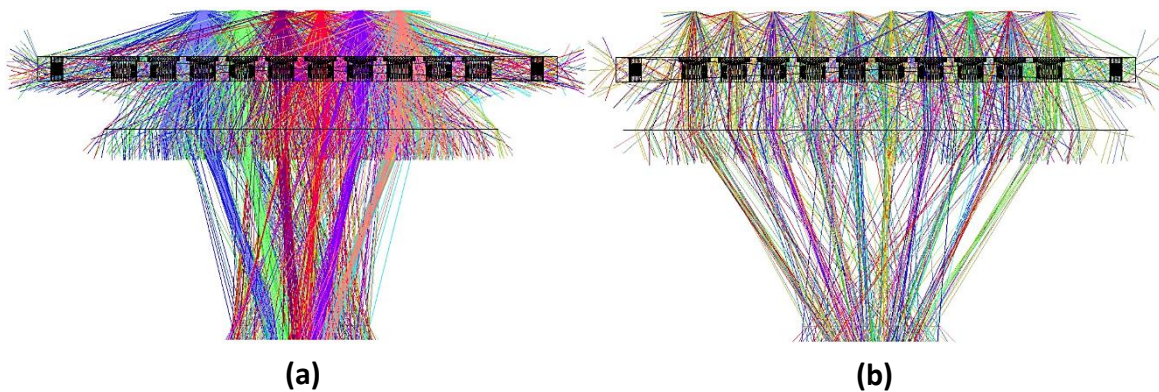


Figura 5.5. Trazado de rayos en Zemax, (a) arreglo 10x10, (b) arreglo 6x6

Para ambos arreglos, se aprecia el funcionamiento correcto para cada parte que lo integra. En la parte superior se encuentran los leds emitiendo los rayos, limitado por su ángulo de apertura, impactando el arreglo de multi lentes paraxiales divergentes, obteniendo rayos colimados que atraviesan la lente de fresnel que, finalmente, concentra los rayos hacia un punto específico, impactando sobre el detector.

5.1.2 Resultados de las simulaciones Zemax

En la salida del arreglo óptico simulado se encuentra un detector cuyas medidas de $100 \times 100 \text{ mm}$ nos permiten capturar la mayoría de los rayos emitidos por las fuentes de luz. En la figura 5.2 se puede observar que la mancha obtenida de ambos sistemas es cuadrada y tienen una distribución tipo flat up, es decir, en un área el valor de irradiancia aumenta bruscamente a un nivel alto.

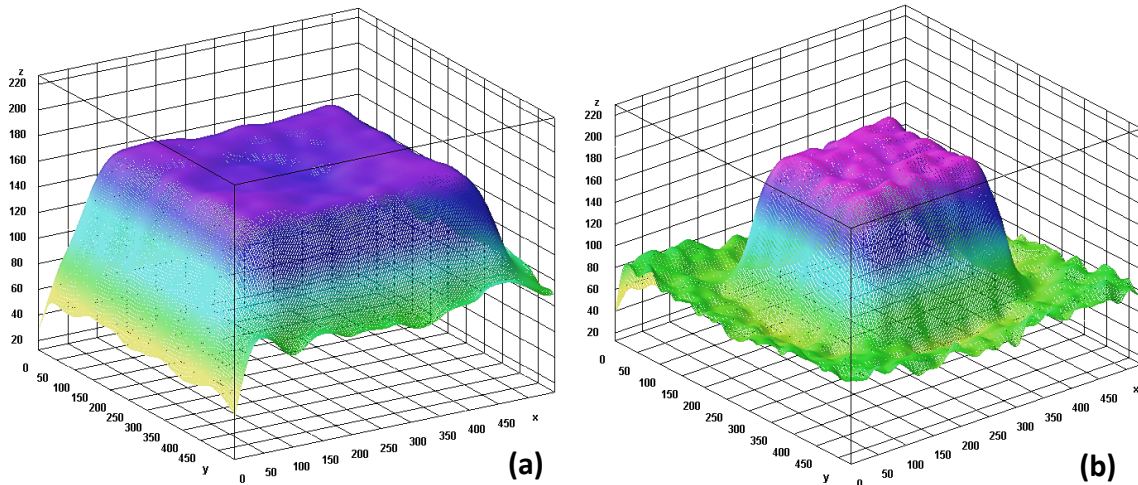


Figura 5.6. Gráfica 3D de la mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico, (a) arreglo 10x10, (b) arreglo 6x6

En la figura 5.3 como complemento, se muestra una gráfica de dispersión de la sección transversal de ambos resultados que corrobora la teoría de distribución tipo flat up, obteniendo valores promedio de irradiancia de 6300 mW/cm^2 y de 1900 mW/cm^2 , respectivamente.

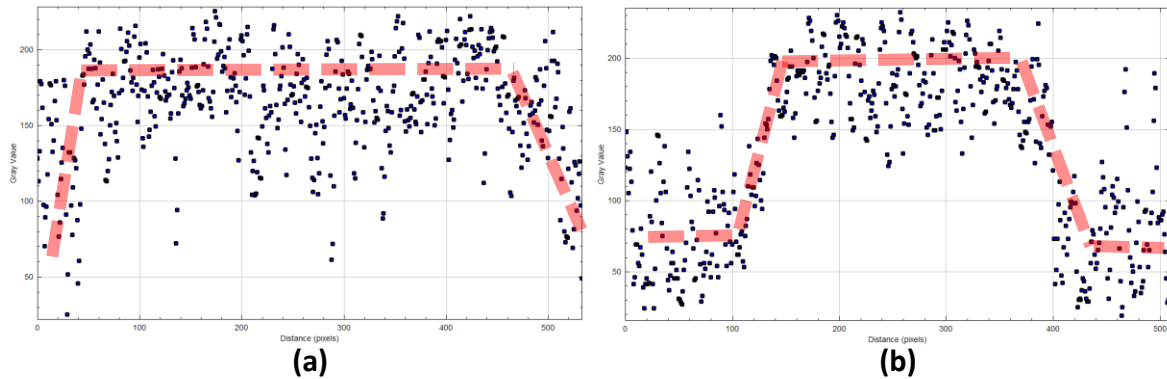


Figura 5.7. Gráfica de dispersión de la sección transversal de la mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico, (a) arreglo 10x10, (b) arreglo 6x6

5.2 Estado estacionario versus Proceso en masa

En este documento, cuando se menciona “estado estacionario”, se hace referencia a la condición de simulación en la cual no existen perturbaciones externas y el sistema alcanza un equilibrio térmico, permitiendo que la transferencia de calor ocurra predominantemente a través de la convección natural.

Por otro lado, el término “proceso en masa” se utiliza para describir la condición de simulación donde existe movimiento o traslado significativo de fluido inducido por una fuente externa, resultado del movimiento de la banda. Este movimiento forzado provoca una convección forzada, donde el transporte de calor es impulsado por la energía mecánica aplicada al sistema, resultando una transferencia de calor mayor, en comparación con la de convección natural.

A continuación, se presentan los resultados de ambas simulaciones:

- Simulación “Estado estacionario”: La simulación de la figura 3.16 predice alcanzar 692.51°C como temperatura máxima distribuida sobre el componente, pareciendo tener comportamiento de distribución tipo bimodal. La figura 5.4 nos muestra una gráfica 3D y un corte de sección transversal, donde se aprecia una distribución tipo bimodal simétrica, con forma platicúrtica y cola pesada, del resultado de la simulación.
- Simulación “Proceso en masa”: La simulación de la figura 3.17 predice alcanzar 685.59°C como temperatura máxima distribuida sobre el componente, pareciendo tener comportamiento de distribución tipo normal. La figura 5.5 nos muestra su correspondiente gráfica 3D y corte de sección transversal, donde se aprecia la distribución tipo normal simétrica, con forma platicúrtica y cola más ligera que en la simulación anterior.

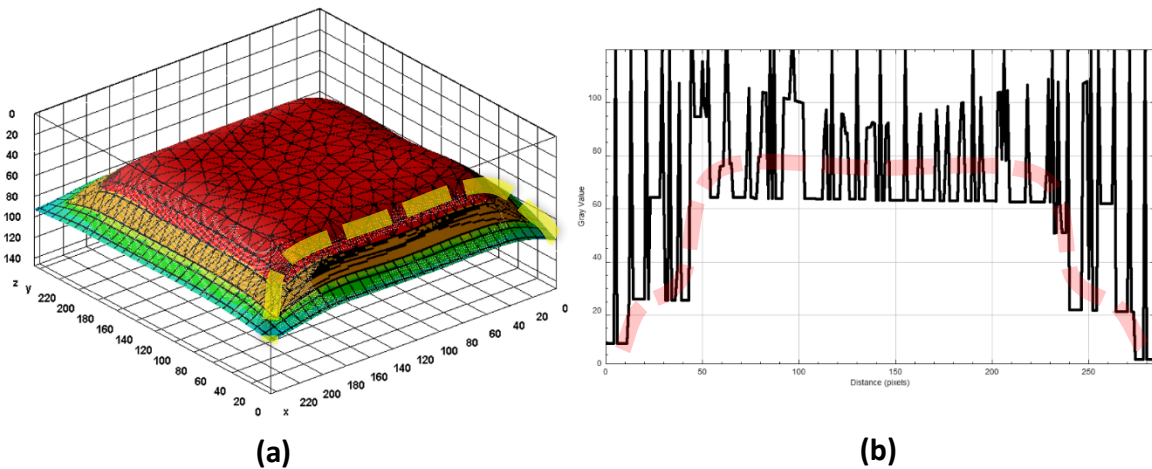


Figura 5.8. Simulación de la distribución de temperaturas realizada en Ansys para “estado estacionario”, (a) gráfica 3D, (b) sección transversal

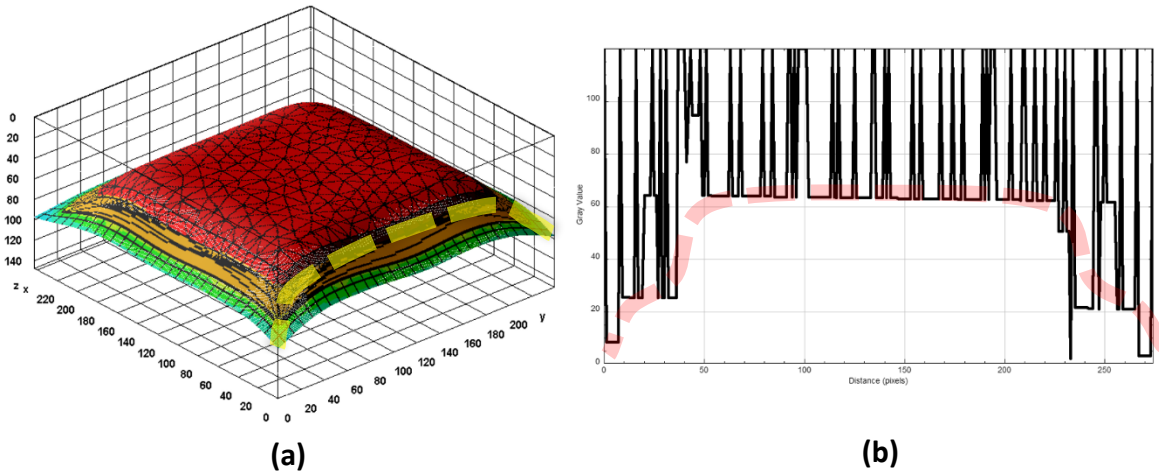


Figura 5.9. Simulación de la distribución de temperaturas realizada en Ansys para “proceso en masa”, (a) gráfica 3D, (b) sección transversal

La tabla 5.1 muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada simulación planteada para los arreglos 10x10. Se puede observar que las distribuciones térmicas son muy similares para ambas simulaciones con la diferencia destacable donde para la simulación de “estado estacionario” muestra temperaturas altas en las orillas del componente y una concentración casi uniforme sobre la cara superior del mismo. Por otra parte, las temperaturas máximas alcanzadas, como es esperado por los valores del coeficiente de convección, se encuentran ligeramente más bajas en la simulación de “proceso en masa”.

Tabla 5.6. Resumen de resultados obtenidos de Estado estacionario versus Proceso en masa

Resultados	Estado estacionario	Proceso en masa
Distribución térmica	Distribución tipo bimodal simétrica, con forma platicúrtica y cola pesada	Distribución tipo normal simétrica, con forma platicúrtica y cola ligera
Temperatura máxima (°C)	692.51	685.59

Las diferencias observadas en la temperatura son pequeñas y son ocasionadas por el flujo de aire generado por la banda al introducirse en un proceso en masa. De acuerdo a [73] y [74], los flujos de aire pequeños, como lo son en estos casos, con velocidades promedio 0.3 m/s de una banda para procesos de ensamblaje electrónico, la variación de temperatura que puede haber se encuentra desde valores cercanos a 1°C hasta 17°C en comparación con la convección natural.

5.3 Simulación versus Prueba experimental

Para el análisis de comparación de las simulaciones realizadas en Zemax y Ansys, con los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, en la figura 5.6 se muestra visualmente la comparación del impacto de la mancha de luz obtenida del arreglo óptico matricial de leds y lentes de 6x6 sobre un detector, y, en la figura 5.7 se presentan gráficamente los valores de temperatura alcanzados en equilibrio térmico como respuesta a una señal tipo escalón en un sistema de lazo abierto.

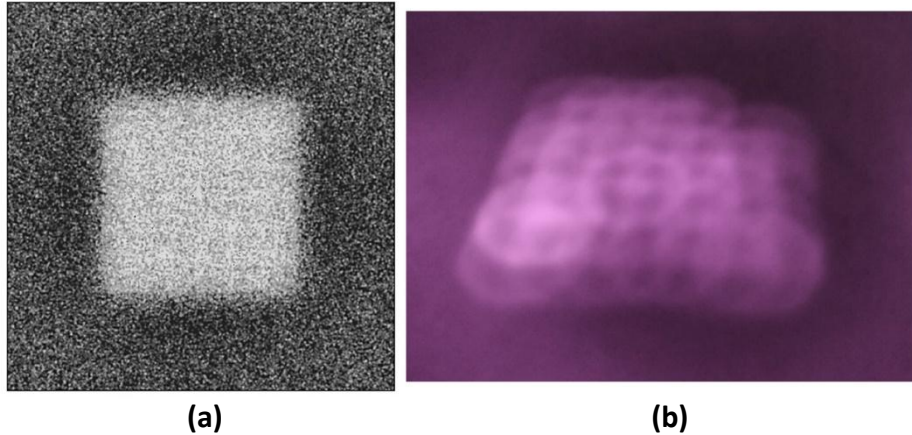


Figura 5.10. Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico con matriz de 6x6, (a) resultado de simulación en Zemax, (b) resultado de experimento

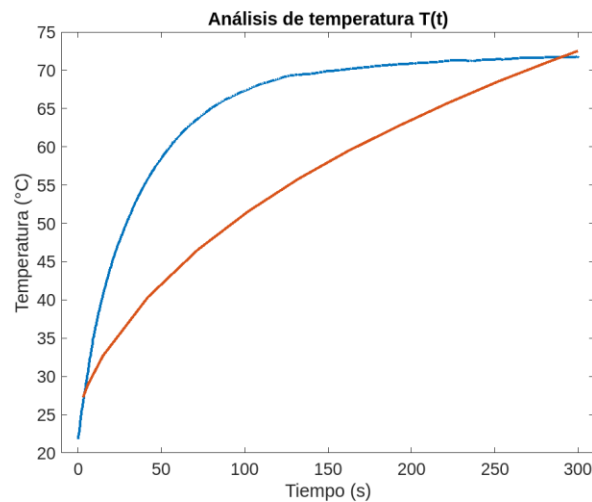


Figura 5.11. Respuesta experimental del sistema a lazo abierto, donde la línea roja representa el resultado de simulación en Ansys y la azul representa a la temperatura medida experimentalmente

Se pueden observar para los resultados de la simulación:

- Distribución espacial de la luz: Por medio de un análisis de trazado de rayos, se predice una mancha con geometría cuadrada, mayormente homogénea en el centro, y un despreciable impacto en los bordes.
- Tamaño de la mancha: La mancha obtenida cuenta con dimensiones de $20 \times 20 \text{ mm}$.
- Temperaturas máximas: La simulación predice alcanzar 72.529°C como temperatura máxima distribuida sobre el componente.

Por otro lado, para los resultados experimentales se registran:

- Distribución espacial de la luz: Con ayuda de una hoja blanca, un cuarto oscuro y unos lentes de protección, se percibe una mancha con geometría cuadrada, mayormente homogénea y un impacto tenue en los bordes.
- Tamaño de la mancha: La mancha obtenida del prototipo, al final del arreglo óptico, fue medida con ayuda de una regla, contando con dimensiones de $20 \times 20 \text{ mm}$.

- Temperaturas máximas: Con ayuda de un termopar ubicado sobre el centro del componente, se midieron temperaturas máximas de 71.681°C.

La tabla 5.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos de la última simulación planteada para el arreglo 6x6, figura 3.31, y las mediciones obtenidas del experimento realizado en el prototipo. Se puede observar que las distribuciones ópticas, así como los valores de temperaturas máximas son muy similares.

Tabla 5.2. Resumen de resultados obtenidos de Simulación versus Prueba experimental

Resultados	Simulación	Prueba experimental
Distribución espacial de la luz	Mancha cuadrada	Mancha cuadrada
Tamaño de mancha (mm)	20	20
Temperatura máxima (°C)	72.529	71.681

La forma de la mancha y tamaño son consistentes, indicando una buena correlación entre el modelo simulado y el prototipo experimental, en el aspecto óptico.

Las diferencias observadas en la temperatura máxima son mínimas, sugieren que el modelo de la simulación es bastante preciso, pero puede necesitar ajustes finos en el modelo 3D del componente completo, así como un tipo de unión más adecuado, incluyendo un material más ajustado a las características y propiedades.

Además, estas variaciones pueden deberse a imperfecciones en la fabricación del prototipo, variaciones en el proceso de fabricación de la lente que no se modelaron en la simulación, presencia de impurezas en los materiales, pérdidas adicionales no consideradas, entre otras.

Si bien, el impacto de los puntos observados anteriormente es pequeño o no significativo y no afectan el rendimiento y acercamiento general de los resultados para cada situación, indican áreas donde se puede mejorar la precisión del modelo.

5.4 Análisis de control del perfil de reflujo

El perfil de reflujo es un aspecto crítico en diversos procesos industriales, especialmente en la industria electrónica para el proceso de soldadura. La precisión en el control de la temperatura determina la calidad y fiabilidad del producto final. Para optimizar este control, son utilizadas diferentes estrategias de control con la finalidad de mejorar la estabilidad, precisión y eficiencia del sistema.

En esta sección, se compararán y analizarán dos tipos de estrategias de control abordadas en el capítulo 4:

- Control de lazo cerrado con acción PI: Basado en la retroalimentación del sistema, el controlador PI ajusta la salida en función del error presentado.
- Control de lazo cerrado con acción PI pre-compensado: Esta estrategia avanzada, busca incorporar una compensación previa que anticipa las variaciones del sistema, combinada con el control PI.

En la figura 5.8 se muestra una gráfica del experimento de seguimiento del perfil de reflujo escalado que contiene el perfil de referencia, la respuesta experimental del control de lazo cerrado con acción PI y la respuesta del control de lazo cerrado con acción PI pre-compensado.

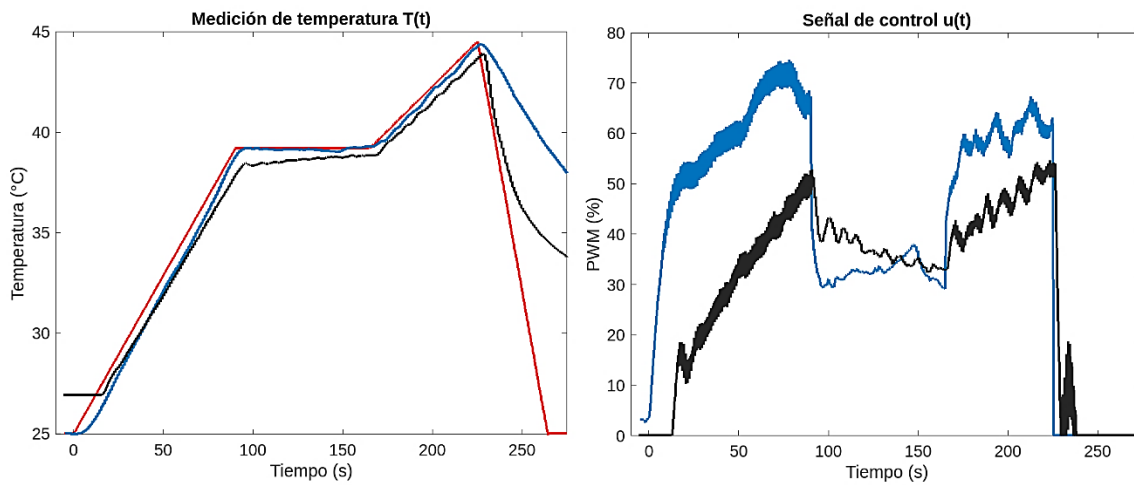


Figura 5.12. Respuesta experimental del sistema, donde la línea roja representa la referencia, la línea negra representa la respuesta al sistema de control de lazo cerrado con acción PI y la azul representa a la respuesta al sistema de control de lazo cerrado con acción PI pre-compensada

Si bien, la retroalimentación y ajuste continuo ofrecido por el control de lazo cerrado con acción PI mejora la respuesta del sistema, la pre-compensación ofrecido por el segundo sistema de control permite responder de manera más eficiente a las perturbaciones y cambios en el proceso, mejorando la estabilidad y la precisión del control de temperatura para el seguimiento del perfil de reflujo. Destacando que ninguno de los controles presentados para la señal de control sobrepasa el 80%.

En la figura 5.9, en la gráfica inferior se puede observar el error obtenido por ambos sistemas, siendo valores de error menores a 2°C , satisfaciendo los criterios establecidos en la ficha técnica del fabricante para placas de alta densidad hasta el momento en que se deja enfriar el componente a temperatura ambiente en el instante de tiempo marcado en la figura.

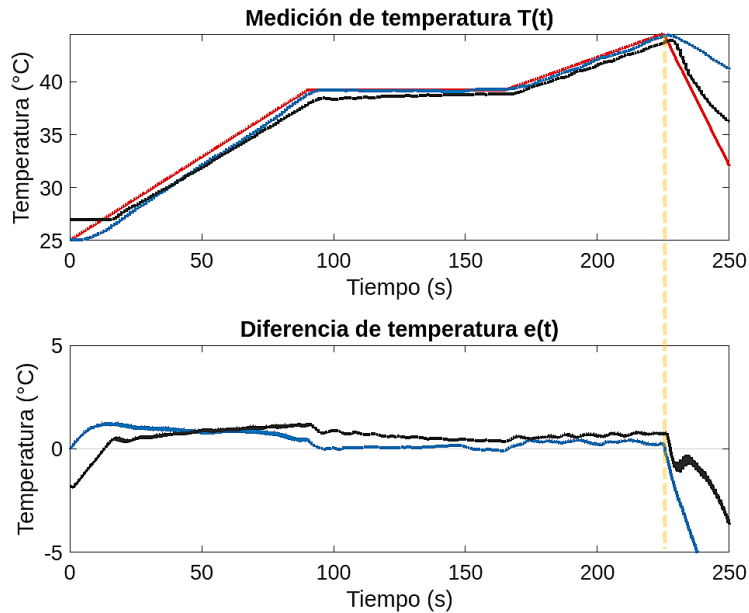


Figura 5.13. Comparación entre la temperatura de la referencia, línea roja, la temperatura del experimento del sistema de control de lazo cerrado con acción PI, línea negra, y la temperatura del experimento del sistema de control de lazo cerrado con acción PI pre-compensada

5.5 Impacto de variación de valores en simulaciones Ansys

En el estudio de fenómenos térmicos y de transferencia de calor, la simulación de análisis transitorio es una herramienta crucial para entender el comportamiento dinámico de los sistemas a lo largo del tiempo. Este tipo de análisis permite evaluar cómo cambian las temperaturas del sistema y cómo estas variaciones afectan, o no, su desempeño y estabilidad general.

En esta sección nos enfocamos en la variación de tres variables clave que influyen en la transferencia de calor: el coeficiente de convección, el valor de emisividad y los materiales que integran el sistema a analizar en la simulación.

El coeficiente de convección describe la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido, mientras que el valor de emisividad define la capacidad de una superficie para emitir energía térmica. El material del sistema también juega un papel crítico, ya que diferentes materiales tienen propiedades térmicas distintas que pueden afectar significativamente el comportamiento del sistema.

En la figura 5.10 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas en Ansys, resultados de variaciones estratégicas en las variables de coeficiente de convección y emisividad descritos anteriormente.

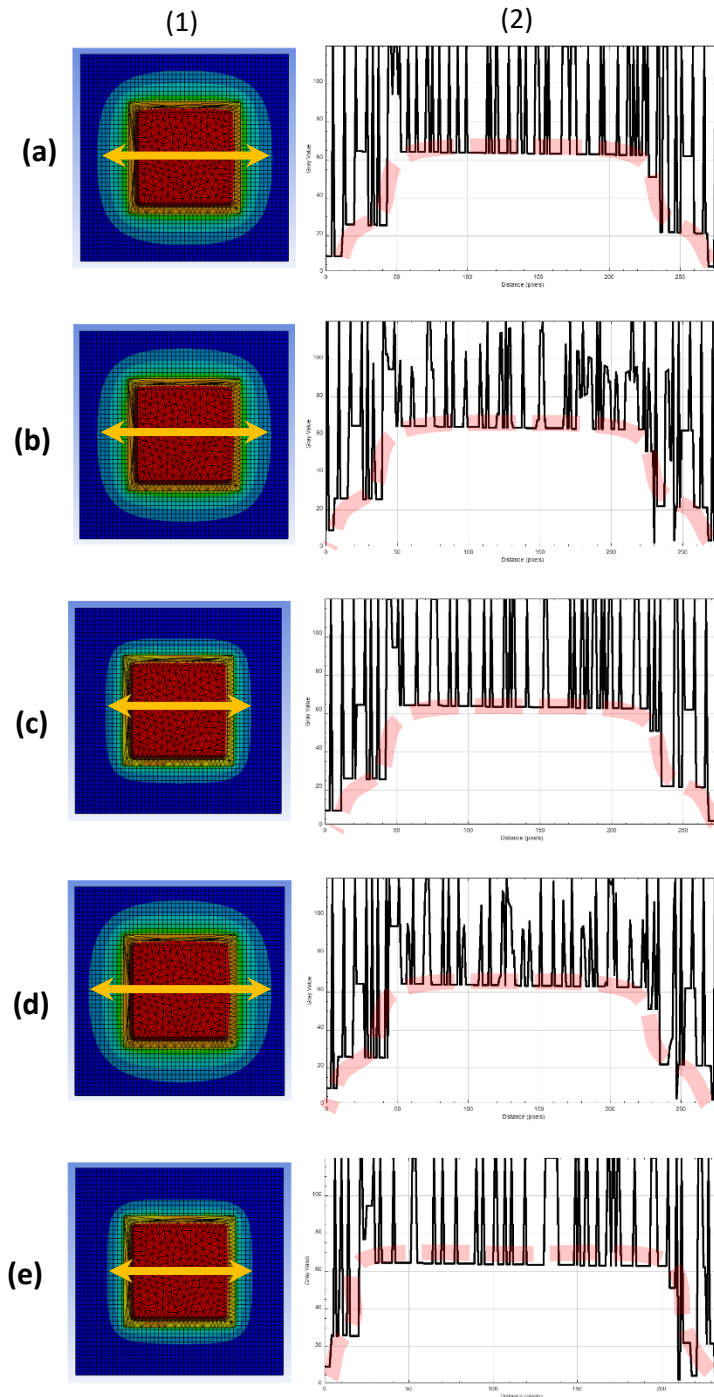


Figura 5.18. Resultados de la distribución de temperaturas de las simulaciones con variaciones en el coeficiente de convección y emisividad realizadas, (1) resultado de simulación en Ansys, (2) sección transversal de la distribución de temperaturas

En la figura (a) se muestra el resultado de una simulación cuyos valores de entrada son:

- $h_c = 10.785 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $h_p = 4.3757 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $e = 0.65$

En la figura (b) se muestra el resultado de una simulación cuyos valores de entrada son:

- $h_c = 10.785 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $h_p = 4.3757 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $e = 0.95$

En la figura (c) se muestra el resultado de una simulación cuyos valores de entrada son:

- $h_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $h_p = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $e = 0.65$

En la figura (d) se muestra el resultado de una simulación cuyos valores de entrada son:

- $h_c = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $h_p = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $e = 0.65$

En la figura (e) se muestra el resultado de una simulación cuyos valores de entrada son:

- $h_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $h_p = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $e = 0.95$

Donde h_c representa el coeficiente de convección en el componente, h_p el coeficiente de convección en la placa y e la emisividad.

Se puede observar que todos los resultados mostrados cuentan con un tipo de distribución normal simétrica, con forma platicúrtica y cola ligera. Sin embargo, es importante destacar que el alcance de cada resultado varía de uno a otro. Las características de cada resultado se resumen de la siguiente manera para cada figura:

- (a) Se puede observar que tiene una distribución promedio y alcanza temperaturas máximas de 358.93°C , ubicadas sobre la superficie del componente.
- (b) Cuenta con una distribución similar a la anterior teniendo como diferencia las temperaturas máximas que alcanza, siendo estas de 323.47°C , ubicadas sobre la superficie del componente.
- (c) Esta figura tiene una distribución con menor alcance que las figuras anteriores y cuenta con temperaturas máximas de 251.31°C , ubicadas sobre la superficie del componente.
- (d) Se muestra una distribución con un ligero mayor alcance que el promedio, alcanzando temperaturas de 407.89°C .
- (e) Por último, esta figura al igual que la figura (c) cuenta con una distribución con un alcance reducido y como temperatura máxima alcanza 238.39°C .

Finalmente, podemos concluir que el valor de coeficiente de convección contribuye al alcance de la distribución térmica, mientras mayor sea el coeficiente, menor será el alcance de la distribución de temperatura, y viceversa.

Con respecto al material, en la figura 5.11 se muestra la comparación de los resultados obtenidos de la simulación del sistema donde en la figura (a) se contempla un componente, cuyos materiales predominantes son el FR-4 epoxy y el cobre. En cuanto a la figura (b), el único material predominante es el FR-4 epoxy.

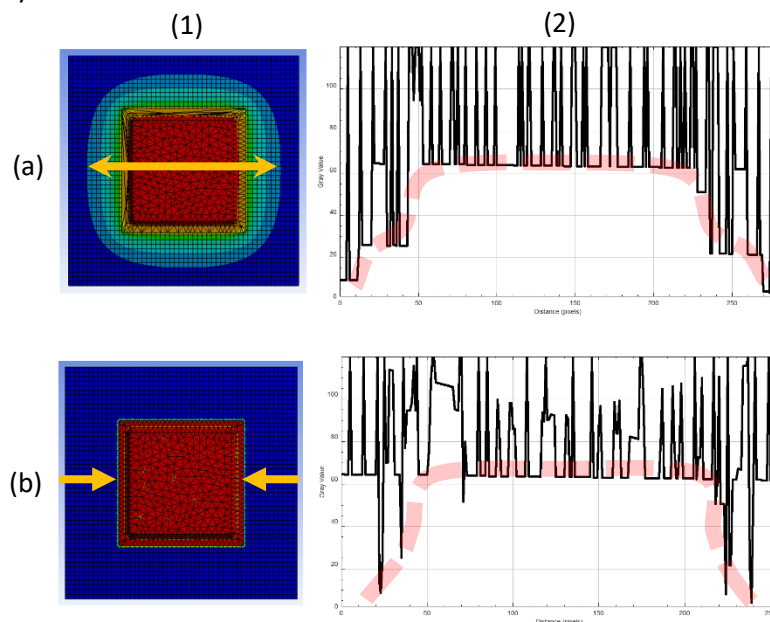


Figura 5.15. Resultados de la distribución de temperaturas de las simulaciones con variaciones en el material del componente, (1) resultado de simulación en Ansys, (2) sección transversal de la distribución de temperaturas

En el contexto de transferencia de calor, el cobre y el FR-4 epoxy tienen propiedades térmicas muy distintas que influyen significativamente en su comportamiento. El cobre, al tener una alta conductividad térmica, puede transferir calor rápidamente, siendo ideal para aplicaciones donde se requiera una rápida disipación de calor. El FR-4 epoxy en cambio, tiene una conductividad térmica mucho más baja, no siendo eficiente para la disipación de calor, haciéndolo un aislante térmico relativamente eficiente.

Las características de los resultados se resumen de la siguiente manera para cada figura:

- (a) Contando con un tipo de distribución normal simétrica, con forma platicúrtica y cola ligera, alcanza temperaturas máximas de 358.93°C , ubicadas sobre la superficie del componente.
- (b) Diferente de la figura (a), cuenta con una distribución tipo flat up, con temperaturas máximas de 72.529°C .

Comparando los resultados obtenidos de las simulaciones térmicas podemos concluir que en el caso del sistema que contempla un componente con cobre, la alta conductividad del cobre facilita una transferencia rápida del calor hacia el material FR-4 epoxy, acumulando significativamente el calor y, por ende, altas temperaturas. Por el contrario, en el caso del sistema que no contempla el cobre, sin la presencia de este, el calor generado en el sistema se disipa de manera más uniforme a través del material FR-4 epoxy, evitando puntos calientes y obteniendo temperaturas más bajas.

Conclusiones generales

En el campo de la ingeniería y procesos térmicos, es fundamental entender cómo se comporta la temperatura en un sistema a lo largo del tiempo en su estado definido, ya sea este uno estático o uno ubicado en un proceso en masa. Es importante, además, realizar un análisis profundo del material de cada componente que integra el sistema.

Estos análisis son cruciales para el diseño y optimización de los sistemas de transferencia de calor, como lo es el sistema de soldado de componentes.

El modelo desarrollado para las simulaciones puede predecir con buena precisión la distribución óptica en conjunto del tipo de mancha y sus dimensiones, la distribución térmica y las temperaturas máximas, con diferencias mínimas.

Estas simulaciones son una herramienta eficaz para el diseño óptico, en combinación con su correspondiente análisis térmico, ayudando a reducir la necesidad de realizar múltiples iteraciones de prototipos.

TRABAJOS FUTUROS

Capítulo seis

Con base a lo visto en el capítulo 5, para futuras investigaciones se recomienda:

- Ajustar el modelo del sistema simulado, incluyendo variables no contempladas del proceso de fabricación, un ejemplo de estas variables son los tipos de materiales seleccionados, en conjunto con sus proporciones y características específicas.
- Investigar el impacto de diferentes materiales, para la parte del arreglo óptico, buscando mejorar la eficiencia de transmisión de los rayos infrarrojos, entre ellas encontramos la adición de películas antirreflejantes a los elementos ópticos, el uso de lentes asféricas en vez de esféricas para obtener un mayor aprovechamiento de rayos emitidos de la fuente de luz, hacer uso del material Fused Silica, utilizado comúnmente para el espectro infrarrojo debido a sus características y propiedades específicas.
- Mejorar el modelo de control para seguimiento de perfiles térmicos, incorporando algoritmos más avanzados que contemplen las variaciones del perfil de reflujos y otras perturbaciones externas que intervengan.

REFERENCIAS

- [1] Van Dijk, J. G. R. (1964). The Physical Basis of Electronics. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-81720-7>
- [2] Bishop, G. (1985). Audio Circuits and Projects. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-07404-4>
- [3] Voß, D. (2000). Cheap and cheerful circuits. *Nature*, 407(6803), 442-444. <https://doi.org/10.1038/35035212>
- [4] Blackburn, J. A. (2002). Modern Instrumentation for Scientists and Engineers. *Measurement Science & Technology*, 13(10), 1652-1653. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/10/705>
- [5] Stanisz, D., Machniewicz, T., Parzych, S., Jeż, G., Dvorkin, L., & Hebda, M. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Joints Depending on the Process Used. *Materials*, 15(15), 5171. <https://doi.org/10.3390/ma15155171>
- [6] Li, M. (2015). Development and Prospect of Friction Surfacing Technology. *Advances In Intelligent Systems Research/Advances in Intelligent Systems Research*. <https://doi.org/10.2991/kam-15.2015.67>
- [7] Aydin, M., & Bulut, R. (2010). The weldability of AZ31 magnesium alloy by friction stir welding. *Kovové Materiály*, 48(2), 97-104. https://doi.org/10.4149/km_2010_2_97
- [8] Herat, S. (2008). Green Electronics through Legislation and Lead-Free Soldering. *Clean*, 36(2), 145-151. <https://doi.org/10.1002/clen.200700164>
- [9] Choudhury, A. K. R. (2017). Green Chemistry and Textile Industry. *Journal Of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2(3). <https://doi.org/10.15406/jteft.2017.02.00056>
- [10] Bell, A. J., & Deubzer, O. (2018). Lead-free piezo electrics—The environmental and regulatory issues. *MRS Bulletin*, 43(8), 581-587. <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.154>
- [11] Salgado, B., Endara, D., Aragón-Tobar, C. F., De la Torre, E., & Ullauri, L. A. S. (2024). Recovery of Residual Lead from Automotive Battery Recycling Slag Using Deep Eutectic Solvents. *Molecules/Molecules Online/Molecules Annual*, 29(2), 394. <https://doi.org/10.3390/molecules29020394>
- [12] Bradley, E., Handwerker, C. A., Bath, J., Parker, R. D., & Gedney, R. W. (2007). Lead-Free electronics: iNEMI Projects Lead to Successful Manufacturing. John Wiley & Sons. En Wiley eBooks. <https://doi.org/10.1002/9780470171479>
- [13] Adeline, P., Lima, Z., Yantaraa, N., Loo, S., Tee, T. Y., Tan, C. M., & Chen, Z. (2008, 1 diciembre). Fracture Toughness Assessment of a Solder Joint using Double Cantilever Beam Specimens. 10th Electronics Packaging Technology Conference. <https://doi.org/10.1109/eptc.2008.4763571>
- [14] Fonseka, C. L. S. C., & Jayasinghe, J. A. K. S. (2019). Implementation of an Automatic Optical Inspection System for Solder Quality Classification of THT Solder Joints. *IEEE Transactions on Components, Packaging, And Manufacturing Technology*, 9(2), 353-366. <https://doi.org/10.1109/tcpmt.2018.2864666>
- [15] Surtel electrónica. (2020–10-30). ¿Qué son los componentes THT? <https://www.surtel.es/blog/que-son-los-componentes-tht/>
- [16] Aguayo González, F. (2016, 8 abril). Ventajas que ofrecen los componentes SMD. *Idus - Depósito de Investigación Universidad de Sevilla*. <https://idus.us.es/handle/11441/39868>
- [17] Savu, S. V., Ghelsingher, C. D., Ştefan, I., Sîrbu, N., Tarniţă, D., Simion, D., Savu, I. D., Bucşe, I. G., & Ţunescu, T. (2023). Microwave Soldering of Low-Resistance Conductive Joints—Technical and Economic Aspects. *Materials*, 16(9), 3311. <https://doi.org/10.3390/ma16093311>
- [18] Townes, C. H. (2007). Theodore H. Maiman (1927–2007). *Nature*, 447(7145), 654. <https://doi.org/10.1038/447654a>

- [19] Boyd, R. W., Athale, R. A., Onural, L., & Seka, W. (2010). Lasers: The first fifty Years. *Applied Optics*, 49(25), LF1. <https://doi.org/10.1364/ao.49.000lf1>
- [20] Nowak, M., Wiśniewski, D., Buchowski, J., & Thomas, A. (2017). Zrobotyzowany system do spawania laserowego LAPRISS (Laser Processing Robot Integrated System Solution) firmy PANASONIC. *Przegląd Spawalnictwa*, 89(10). <https://doi.org/10.26628/ps.v89i10.822>
- [21] Chukhlantsev D. O., Umnov V. P., Maltsev V. V., Shipikhin D. A. (2020). Complejo tecnológico láser universal altamente automatizado basado en un láser multihaz. *Fotonika*, 14(6), 482-490. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.fros.2020.14.6.482.490>
- [22] Seehase, D., Kohlen, C., Neiser, A., Novikov, A., & Nowotnick, M. (2018). Selective Soldering on Printed Circuit Boards with Endogenous Induction Heat at Appropriate Susceptors. *Periodica Polytechnica. Electrical Engineering and Computer Science*, 62(4), 172-180. <https://doi.org/10.3311/ppee.13277>
- [23] Chuyko, M. M., & Zavalsky V. (2021). THE CONTACT ANGLE CONTROL OF THE SOLDER FOR IMPROVING THE SOLDERING QUALITY. *Perspektivni Tehnologii Ta Priladi*, 17, 161-166. <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-17-24>
- [24] Laverde, A. (2020, 21 marzo). Procesos de ensamble de PCB – Introducción. |Normas IPC|Certificación|ALDELTA. <https://www.aldeltatec.com/blog-diseno-con-normas-y-certificaciones/procesos-de-ensamble-de-pcb/>
- [25] Straubinger, D., Illés, B., Busek, D., Codreanu, N., & Géczy, A. (2022, mayo). Modelling of thermocouple geometry variations for improved heat transfer monitoring in smart electronic manufacturing environment. *Case Studies in Thermal Engineering*, art. 102001. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102001>
- [26] Gokulnath, A. R., Chandrakumar, S., Sudhakar, T. D. (2018). Open Source Automated SMD Pick and Place Machine. *Procedia Computer Science*, 872–878. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.107>
- [27] Anguiano, C., Natzu, K., Félix, M., Hernández-Fuentes, I. O., Herrera, R., Lizárraga, N., Zamora, M., Salazar, D., & Márquez, H. (2021, septiembre). The effect of variable irradiation mask in Focused Infrared Light Soldering Systems for electronic components. *Optik*, art. 167298. <https://doi.org/10.1016/j.jileo.2021.167298>
- [28] Romo García, J. (2021). Simulación de un sistema para soldar múltiples componentes SMD en un PCB con luz infrarroja [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California]. <https://drive.google.com/file/d/1Oa-MFXOVzHaPtt8q3sunjZs4DKLOO9N/view>
- [29] de Prada Pérez de Azpeitia F. I. (2016) La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 13 (3), 617-627. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10498/18501>
- [30] Marins, J.C.B.; Fernández-Cuevas, I.; Arnaiz-Lastras, J.; Fernandes, A.A. y Sillero-Quintana, M. (2015). Aplicaciones de la termografía infrarroja en el deporte. Una revisión / Applications of Infrared Thermography in Sports. A Review. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte* vol. 15 (60) pp. 805-824. <http://cdeporte.rediris.es/revista/revista60/artaplicaciones594.htm>
- [31] Mozo, A. G. (2013). La reflectografía infrarroja y la historia del arte. En *La ciencia y el arte IV: ciencias experimentales y conservación del patrimonio* (pp. 163-177). Subdirección General de Documentación y Publicaciones. ISBN 978-92-0-000140-6. la-ciencia-y-el-arte-4-esp.pdf (ibermuseos.org)
- [32] Serrano Malagón, L. M., & Núñez Campo, A. M. (2014, 9 septiembre). Estado del arte de la termografía infrarroja como herramienta en los procesos industriales. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/1644>

- [33] Iguaz Gaínza, A. (2001). La radiación infrarroja aplicada a la deshidratación. Alimentación, Equipos y Tecnología, ISSN 0212-1689.
- [34] Freire Orozco, R. A. (2017). Diseño de un sistema de detección y repulsión de roedores en la granja experimental de Nono a través de tecnología infrarroja y ultrasonido [Tesis de licenciatura]. Universidad de las Américas. URI: <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/7426>
- [35] Anguiano, C., Félix, M., Medel, A., Bravo, M., Salazar, D., & Márquez, H. (2013). Study of heating capacity of focused IR light soldering systems. Optics Express, 21(20), 23851. <https://doi.org/10.1364/oe.21.023851>
- [36] Ma, G., Huang, X., & Liu, S. (2021). Heat Transfer Modeling and Oven Temperature Curve Optimization of Integrated Circuit Board Reflow Soldering. IEEE Access, 9, 141876-141889. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3120496>
- [37] Lam, T. L. (2021). Low-Cost non-contact pcbs Temperature Monitoring and Control in a Hot Air Reflow Process Based on Multiple Thermocouples Data Fusion. IEEE Access, 9, 123566-123574. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3036527>
- [38] Secretaría de economía [Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología]. (2012). Industria electrónica en México. En Secretaría de Economía (SE-DGIPAT). https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/monografia_industria_electronica_Oct2012.pdf
- [39] Zavala Aznar, G. & Secretaría de economía. (2014). Industria electrónica. ProMéxico, 1. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76339/141216_DS_Electronico_ES.pdf
- [40] TE connectivity. (s. f.). SMF7220KJT hoja de datos [Conjunto de datos]. <https://www.te.com/usa-en/product-5-2176460-6.datasheet.pdf>
- [41] Qorvo. (2023). QPB7432 hoja de datos [Conjunto de datos]. <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1420040/QORVO/QPB7432.html>
- [42] Becker, S. (2014). Foundations of Heat Transfer. Von F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine. Chemie-Ingenieur-Technik/Chemieingenieurtechnik, 86(3), 395-396. <https://doi.org/10.1002/cite.201490018>
- [43] López Santiago, J. A. (2001). Análisis de la capa límite térmica sobre una placa horizontal en convección natural [Tesis de licenciatura]. Universidad de las Américas Puebla. URI: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/lopez_s_ja/
- [44] Martín Domingo Agustín. (2011). Apuntes de transmisión de calor [Conjunto de datos]. En Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>
- [45] Hecht, E. (2018). Optik. En De Gruyter ebooks. <https://doi.org/10.1515/9783110526653>
- [46] Pardo Martín, C. F. (2024). Controlador PID. Picuino. <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>
- [47] Aguayo González, F. (2016). Ventajas que ofrecen los componentes SMD. Depósito de Investigación Universidad de Sevilla. <https://idus.us.es/handle/11441/39868>
- [48] Mazón, E. E., Hernández, A., Mazón, C., Quintero, L. H., & Cano, M. E. (2015, junio). Comparación entre las Velocidades de Calentamiento de un Cautín Inducción Magnética y otro Compuesto de Resistencia. Scielo Brazil. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.10>
- [49] Techspray. (s. f.). Guía definitiva de soldadura electrónica [Conjunto de datos]. En Techspray. <https://mx.techspray.com/gu%C3%ada-definitiva-de-soldadura-electr%C3%b3nica>
- [50] Hampton, C. R. (2017, abril). Herramientas y técnicas para la soldadura por aire caliente de componentes de montaje en superficie. All About Circuits. <https://www.allaboutcircuits.com/projects/tools-techniques-hot-air-soldering-surface-mount-components/>

- [51] Pérez García, J. (2015). Diseño de un sistema de transporte de soportes de PCBs en un proceso de soldadura por ola [Tesis de licenciatura]. Universitat Politècnica de València. URI: <http://hdl.handle.net/10251/69352>.
- [52] Ojeda, A. (2013). Montaje de placa de circuito impreso, reparación de mainboard y soldadura por ola. [Tesis de licenciatura]. Universidad de la fraternidad de agrupaciones Santo Tomás de Aquino. URI: <http://redi.ufasta.edu.ar:8082/jspui/handle/123456789/1437>
- [53] Quimbita Mosquera, R. W. (2020). Implementación de un horno automático de convección para el soldado de componentes electrónicos de montaje superficial [Tesis de licenciatura]. Universidad técnica del norte. URI: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10646>
- [54] Hernández Plascencia, E. (2004). Diseño experimental a un proceso automatizado SMT de impresión de soldadura en pasta y el horneado de la misma en tarjetas para componentes electrónicos [Tesis de maestría]. Universidad panamericana. URI: <https://scripta.up.edu.mx/handle/123456789/8792>
- [55] De Lima, R. B. (2015). Estudo da aplicação do processo Pin-in-Paste na montagem de placas de circuito impresso usando pasta de solda lead-free (SAC). <https://doi.org/10.11606/d.3.2011.tde-03072012-182156>
- [56] AIM Solder. (2020, 26 febrero). Suplemento de perfil para aleaciones libre de plomo [Informativo]. https://aimsolder.com/sites/default/files/reflow_profile_supplement_lead-free_solder_paste_rev_4_spanish.pdf
- [57] Galicia, C. (2019). 13 problemas comunes de soldadura de PCBs que debes evitar. Hacedores. <https://hacedores.com/13-problemas-de-soldadura-de-pcb/>
- [58] Gannamani, R., & Pecht, M. (1996). An experimental study of popcorning in plastic encapsulated microcircuits. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 19(2), 194-201. <https://doi.org/10.1109/95.506104>
- [59] Gallo, A. A., & Munamarty, R. (1995). Popcorning: a failure mechanism in plastic-encapsulated microcircuits. IEEE Transactions on Reliability, 44(3), 362-367. <https://doi.org/10.1109/24.406565>
- [60] Y. Chen and P. Li, "The "popcorn effect" of plastic encapsulated microelectronic devices and the typical cases study," 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, Xi'an, China, 2011, pp. 482-485. <https://doi.org/10.1109/icqr2mse.2011.5976658>
- [61] A. Y. Kuo, W. T. Chen, L. T. Nguyen, K. L. Chen and G. Slenski, "Popcorning-a fracture mechanics approach," 1996 Proceedings 46th Electronic Components and Technology Conference, Orlando, FL, USA, 1996, pp. 869-874. <https://doi.org/10.1109/ectc.1996.550510>
- [62] Pan, K., Ha, J., Wang, H., Veeraraghavan, V. P., & Park, S. (2019). The effect of solder paste volume on surface mount assembly self-alignment. Procedia Manufacturing, 38, 1381-1393. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.150>
- [63] Dey, S., & Shekhar, C. (2022). Optimization of SMT process parameter for yield improvement of PCBs. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, 7(2), 079-086. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2022.7.2.0131>
- [64] Dusek, K., Busek, D., Placek, M., Geczy, A., Krammer, O., & Illés, B. (2018b). Influence of vapor phase soldering fluid galden on wetting forces (tombstone effect). Journal of Materials Processing Technology, 251, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.006>
- [65] Sankar, V., Lakshmi, G., & Sankar, Y. S. (2022). A review of various defects in PCB. Journal of Electronic Testing, 38(5), 481-491. <https://doi.org/10.1007/s10836-022-06026-7>
- [66] Z. Ming, X. Ma, Z. Zhong, K. Wu and C. Tang, "Research of Electrical Connection Between Chip and PCB Based on Conductive Adhesive Film," 2020 21st International Conference on

- Electronic Packaging Technology (ICEPT), Guangzhou, China, 2020, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/icept50128.2020.9202864>
- [67] Ming, Z., Ma, X., Zhong, Z., Wu, K., & Tang, C. (2020). Research of Electrical Connection Between Chip and PCB Based on Conductive Adhesive Film. <https://doi.org/10.3390/app9163208>
- [68] OSRAM. (s. f.-b). OSOLON® Black, SFH 4728AS A01 [Conjunto de datos]. En OSRAM. <https://ams-osram.com/products/leds/ir-leds/osram-oslon-black-sfh-4728as-a01>
- [69] Nekvindová, P., Prajzler, V., Hyps, P., Lyutakov, O., & Jerábek, V. (2014). Flexible Polymer Planar Optical waveguides. *Radioengineering*, 23(3), 776-782. https://www.researchgate.net/publication/287475828_Flexible_Polymer_Planar_Optical_Wave_guides
- [70] OSRAM. (s. f.). OSOLON® Black, SFH 4718A [Conjunto de datos]. En OSRAM. <https://ams-osram.com/products/leds/ir-leds/osram-oslon-black-sfh-4718a>
- [71] K. Khalil, H. (2014). *Nonlinear systems* (3.a ed.). Pearson. http://www.coep.ufrj.br/~liu/livros/Hassan K.Khalil-Nonlinear systems-Prent.djvu_best.pdf
- [72] Mohammed, A., Elnokaly, A., Aly, A. M., & Mahmoud, M. (2022b). Enhanced thermal performance of closed-cell rigid Polyurethane (PU) foam panels using phase change materials (pcms). *Journal Of Advanced Engineering Trends (JAET)/Journal of Advanced Engineering Trends (JAET)*, 41(1), 135-145. <https://doi.org/10.21608/jaet.2020.32508.1022>
- [73] Kamata, Y., Kato, T., Azumi, H., & Watanabe, S. (1986). Convective heat transfer from human body. *Sen'i Gakkaishi*, 42(3), T155-T162. https://doi.org/10.2115/fiber.42.3_t155
- [74] Jaffer, A. G., & Jaffer, M. S. (2024). Mixed Convection from an Isothermal Rough Plate. Arxiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2401.09469>