

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**Estudio teórico-experimental de sistemas ópticos para aplicaciones de
soldadura por luz infrarroja enfocada de dispositivos SMT**

T E S I S

que presenta para obtener el grado de DOCTORA EN CIENCIAS

ROSA CITLALLI ANGUIANO COTA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MARCO ANTONIO FÉLIX LOZANO

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. HERIBERTO MÁRQUEZ BECERRA

MEXICALI, B. C.

MAYO DE 2014



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

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

TESIS DE GRADO

**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SISTEMAS
ÓPTICOS PARA APLICACIONES DE SOLDADURA POR LUZ
INFRARROJA ENFOCADA DE DISPOSITIVOS SMT**

PRESENTADA POR

ROSA CITLALLI ANGUIANO COTA

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ


Dr. Marco Antonio Félix Lozano

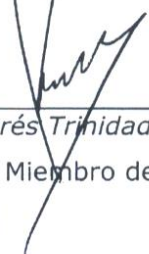
Director del Comité


Dr. Heriberto Márquez Becerra

Codirector del Comité


Dr. David Salazar Miranda

Miembro del Comité


Dr. Andrés Trinidad Medel De Gante

Miembro del Comité


Dr. Carlos Villa Angulo

Miembro del Comité


Dr. Marco Antonio Félix Lozano

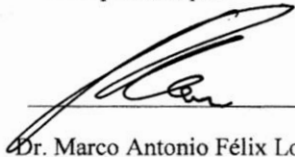
Coordinador de Investigación y
Posgrado
Facultad de Ingeniería

24 de Abril de 2014

RESUMEN de la Tesis de Rosa Citlalli Anguiano Cota, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS. Mexicali, Baja California, México. Mayo de 2014

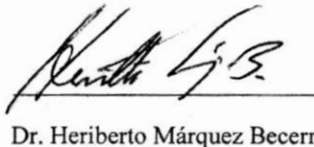
ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SISTEMAS ÓPTICOS PARA APLICACIONES DE SOLDADURA POR LUZ INFRARROJA ENFOCADA DE DISPOSITIVOS SMT

Resumen aprobado por:



Dr. Marco Antonio Félix Lozano

Director de tesis



Dr. Heriberto Márquez Becerra

Codirector de tesis

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta un estudio teórico-experimental de sistemas ópticos para aplicaciones de soldadura por luz infrarroja enfocada de componentes tipo SMT (por sus siglas en inglés: Surface Mount Technology). El estudio comprende el diseño de cuatro sistemas ópticos propuestos como posibles sistemas soldadores para FILSS (por sus siglas en inglés: Focused Infrared Light Soldering System). Además de presentar un análisis de los procesos de irradiancia, transferencia de calor y distribución de temperatura para los diversos sistemas ópticos. Los resultados obtenidos en este trabajo, muestran que el calor obtenido a la salida de los arreglos ópticos propuestos para FILSS, medido en un componente SMT tipo BGA (por sus siglas en inglés: Ball Grid Array) bajo el proceso de soldado, cumple con los requerimientos de distribución de temperatura uniforme, los cuales son definidos por el método de reflujo de los componentes SMT.

Palabras clave:

Infrarrojo, soldadura, SMT, BGA, reflujo, libre de plomo.

ABSTRACT of the thesis, presented by Rosa Citlalli Anguiano Cota, in order to obtain the DOCTOR OF SCIENCES degree. Mexicali, Baja California, México. May, 2014.

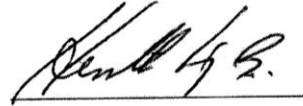
THEORETICAL EXPERIMENTAL STUDY OF OPTICAL SETUPS FOR FOCUSED INFRARED LIGHT SOLDERING TO SMT COMPONENTS APLICATTIONS.

Approved by:



Dr. Marco Antonio Félix Lozano

Thesis Advisor



Dr. Heriberto Márquez Becerra

Thesis Advisor

ABSTRACT

In this work of thesis, a theoretical and experimental study of optical setups for focused infrared light soldering station to SMT components applications (Surface Mount Technology) is presented. The study includes four optical designs proposed as possible optical soldering systems FILSS (Focused Infrared Light Soldering System). Besides presenting an analysis of the irradiance processes, heat transfer and temperature distribution for various optical systems. The results obtained in this work shows that the heat obtained at the output of the proposed FILSS optical setups, measured SMT BGA component (Ball Grid Array) under the welding process meets the requirements uniform temperature distribution, which are defined by the method of the SMT components reflux.

Keywords:

Infrared, solder, SMT, BGA, reflow, lead-free.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de tesis a toda mi familia,
en especial a mi esposo Daniel y mis hijas Rosita y Dana.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por permitirme vivir, ser quien soy, y además de siempre abrirme o cerrarme las puertas cuando ha sido necesario. Muchísimas Gracias.

A mi mamá, quien siempre cuidó y sigue cuidando de mí. Gracias por tus apapachos y regaños, todo esto me ha permitido formarme como persona. Muchas gracias mami.

A mi papá, quien siempre ha estado al pendiente de mí y me ha motivado para que siga adelante en mis estudios, lo que me ha permitido formarme como profesionista. Muchas gracias papi.

A mi esposo Daniel, quien con su amor, comprensión, apoyo, motivación y mucha paciencia, me ha permitido lograr llegar a convertirme en Doctora. Muchas gracias amor. Te amo.

A mi hija Rosita, por convertirme en madre y permitirme conocer el gran amor incondicional que una madre puede llegar a sentir por un hijo. Muchas gracias mi niña hermosa.

A mi hija Dana, por convertirme en madre por segunda ocasión y aprender que uno puede llegar a sentir ese amor incondicional por más de una vez. Muchas gracias mi bebe hermosa. Las amo a las dos.

A mi suegra, por ser como una segunda madre para mí, quien también ha velado y cuidado de mí y de mi familia siempre que la hemos necesitado. Muchas gracias suegra.

A mi suegro, por su apoyo y motivación. Muchas gracias.

A mi hermana Marisol, quien desde pequeña me ha apoyado y hemos vivido y compartido muchas cosas juntas. Muchas gracias Marisol.

A mi hermana Gaby, quien desde pequeña me ha apoyado, cuidado y se preocupado por mí, aunque no debería. Muchas gracias Gaby.

A mi sobrina Victoria por ser una pequeña alegría en la familia y a Edgar por su apoyo. Muchas gracias Gabita.

A mi cuñada Erika, su esposo Raúl y mis sobrinas Daniela y Valeria, por apoyarnos cuando los hemos necesitado. Muchas Gracias.

A Mamilla, que aunque ya no la tenemos con nosotros, siempre nos brindó su cariño. Muchas Gracias Mamilla.

A mi tío Carlos, Angélica y Carlitos por su apoyo, cariño y ayuda.

A mis asesores Marco y Heriberto por guiarme en este largo camino y brindarme consejos, su amistad y ayuda. Muchas Gracias.

A mis sinodales Medel, David y Carlos quienes con sus opiniones y amistad, he logrado llegar al final. Muchas gracias

A mis asesores de maestría Ángel y Galaviz quienes me siguen brindando su amistad y consejos. Muchas gracias.

A mis muchachos de servicio social, Elena, Mikhail, Jorge, Dena, Paco, Elías y Marcos, quienes me ayudaron en el desarrollo de simulaciones y experimentos, así como el que me brindaran su apoyo y amistad. Muchas Gracias.

A toda mi familia, amigos y conocidos quienes me hayan brindado su apoyo y confianza, además de ser parte de mí y mi historia. Muchas gracias.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. Introducción	1
2. Tecnología de Montaje Superficial (SMT)	7
2.1 Historia.	7
2.1.1 Componentes de Montaje Superficial.	8
2.1.2 Tipos de tecnologías de ensamble de Montaje Superficial.	11
2.1.2.1 Tipo I.	11
2.1.2.2 Tipo II.	12
2.1.2.3 Tipo III.	12
2.1.3 Procesos de soldadura de Montaje Superficial.	13
2.1.3.1 Soldadura de ola.	13
2.1.3.2 Soldadura de reflujo.	14
2.1.3.2.1 Reflujo por infrarrojo.	14
2.1.3.2.2 Reflujo por fase de vapor.	16
2.1.3.2.3 Reflujo por convección de aire forzado.	16
2.1.3.2.4 Reflujo por láser.	17
2.1.4 Ventajas de la tecnología de reflujo en SMT.	17
2.2 Tendencias de la Tecnología de Montaje Superficial.	19
2.2.1 Dirección de la tecnología.	19
2.2.2 Paquetes con Arreglo de Área.	19
2.2.2.1 CSP.	20
2.2.2.2 FC.	20
2.2.2.3 BGA.	20
2.2.2.3.1 Proceso de ensamble del BGA.	21
2.2.2.4 Problemas en las etapas de ensamble y re-trabajo.	24
2.2.3 Pasta de soldadura.	37
2.2.3.1 Proceso de soldado.	39
2.2.3.2 Propiedades físicas de la soldadura.	40
3. Fundamentos de óptica.	45
3.1 Introducción.	45
3.2 Óptica geométrica.	46
3.2.1 Reflectores.	46
3.2.1.1 Elíptico.	46
3.2.2 Lentes esféricas.	48
3.2.2.1 Lentes convexas.	51
3.2.2.2 Lentes cóncavas.	53
3.2.3 Lentes asféricas.	54
3.2.4 Homogeneizadores de haz.	55
3.2.4.1 Difusor.	55
3.2.4.2 Multi-lentes.	57
3.2.5 Películas antirreflectoras.	60
3.3 Radiometría.	65
3.3.1 Unidades radiométricas.	66

3.3.1.1 Flujo.	66
3.3.1.2 Irradiancia.	66
3.3.1.3 Intensidad.	66
3.3.1.4 Ángulo sólido.	66
3.3.1.5 Radiancia.	67
3.3.1.6 Emitancia.	67
3.3.2 Fuente de luz IR.	68
3.3.2.1 Ciclo regenerativo del halógeno.	68
3.3.2.2 Radiación de cuerpo negro.	70
3.3.2.3 Radiación de cuerpo gris.	72
4. Arreglos ópticos y simulaciones.	74
4.1 Introducción.	74
4.2 Parámetros de simulación utilizados en todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS.	76
4.2.1 Reflector elíptico.	76
4.2.2 Filamento.	79
4.2.3 Lente condensadora.	83
4.3 Arreglo Básico.	84
4.3.1 Parámetros de simulación para el arreglo básico.	85
4.3.2 Trazo de rayos.	87
4.3.3 Resultados de las simulaciones.	88
4.4 Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado.	89
4.4.1 Parámetros de simulación para el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado.	90
4.5 Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes.	91
4.5.1 Parámetros de simulación para el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes.	92
4.5.2 Trazo de rayos.	95
4.5.3 Resultados de las simulaciones.	95
4.6 Arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes.	96
4.6.1 Parámetros de simulación para el arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes.	97
4.6.2 Trazo de rayos.	98
4.6.3 Resultados de las simulaciones.	98
5. Experimentos y resultados.	100
5.1 Desarrollo experimental.	100
5.1.1 Arreglo experimental para obtención de distribución de luz.	103
5.1.2 Arreglo experimental para obtención de distribución de temperatura.	105
5.1.3 Arreglo experimental para obtención de transferencia de calor.	107
5.1.3.1 Arreglo óptico.	108
5.1.3.2 BGA.	108
5.2 Resultados.	109

5.2.1 Distribución de luz.	109
5.2.2 Distribución de temperatura.	114
5.2.3 Transferencia de calor.	128
5.2.3.1 Arreglo óptico.	129
5.2.3.1 BGA.	130
6. Conclusiones	133
Trabajo Futuro	137
Lista de Productos derivados de la tesis	138
Bibliografía	140

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
2.1 Esquemático de tecnologías en un PCB: (a) Componentes de la tecnología THT atravesando un PCB (b) Componentes de la tecnología SMT montado sobre un PCB [2].	8
2.2 Configuraciones de terminaciones de los empaques de CI. (a) ala; (b) Terminación J; (c) Terminación en tapa; (d) Metalización sin terminaciones; (e) Terminación bola [2].	10
2.3 Esquemático de la placa de montaje superficial tipo I [2].	11
2.4 Esquemático de la placa de montaje superficial tipo II [2].	12
2.5 Esquemático de la placa de montaje superficial tipo III [2].	13
2.6 Proceso de soldadura de doble ola [2].	14
2.7 Procesos de ensamble: (a) Reflujo; (b) Soldadura de ola [2].	18
2.8 Flip Chip ensamblado sobre un BGA [2].	20
2.9 Esquemático de una base laminada de un paquete de BGA [2].	21
2.10 Flujo del proceso de ensamble del BGA [2].	22
2.11 BGA auto-alineándose a la plataforma del PCB debido a la tensión superficial de la soldadura [2].	22
2.12 Perfil de temperatura de reflujo.	23
2.13 Flujo del proceso de re-trabajo en un BGA [2].	24
2.14 Rayos X de las uniones de soldadura de un BGA, (a) Uniones de soldadura de un BGA normal, (b) Insuficiente soldadura en las uniones causadas por una mala soldadura en la vía [2].	26
2.15 Mala auto-alineación de la unión de soldadura de un BGA.	26
2.16 Fotografía de rayos X de una bola que no se auto alinea con el 50% con el pad del board [2].	26
2.17 Bolas de soldadura 62Sn/36Pb/2Ag: (a) bola brillante, (b) bola opaca [2].	27
2.18 Sección transversal de una unión de soldadura BGA que muestra la presencia de un vacío [2].	28
2.19 Fotografía de rayos X de las uniones de un BGA con puentes [2].	29
2.20 Unión de soldadura de un BGA mostrando una apertura. [2].	29
2.21 Esquemático de BGA con alturas diferentes de las uniones.	30
2.22 Fotografía de rayos X de uniones de soldadura 63Sn/37Pb mostrando puentes temporales [2].	31
2.23 Ejemplo de uniones frías [2].	32
2.24 Ejemplo de una no fundición de la soldadura, mostrada por la exposición de los pads de cobre[2].	33
2.25 Ejemplo sobre fundición donde la pasta de soldadura se contrae después del reflujo y se esparce sólo una parte del área que debe cubrirse por la pasta [2].	33
2.26 Disolución de metales y metalizaciones en 60Sn/40Pb [2].	34
2.27 Composición intermetálica entre Cu y soldadura Sn/Pb:	35

	(a) IMC desarrollado en un proceso de soldadura de ola,	
	(b) IMC desarrollado en el proceso de soldadura por reflujo [2].	
2.28	Ejemplo del efecto lápida en un capacitor en chip siendo el mismo caso para un BGA. [2].	35
2.29	Ejemplo de capilaridad de soldadura en terminales J.	36
2.30	Sección transversal de un empaquetado BGA de 2 capas, después de 260° C, indicando delaminación con la fijación del dado y las capas internas del sustrato [2].	37
2.31	Muestras de soldadura de superficies fracturadas, ambas a la misma magnificación [2].	38
2.32	(a) Sección transversal mostrando la aspereza de la aleación Sn–Ag–Cu solidificada. (b) Comparación de la aspereza de uniones de soldaduras Sn–Pb y Sn–Ag–Cu [2].	39
2.33	Proceso de soldado (a) soldadura líquida esparcida sobre una base metal, (b) metal-base disuelta en soldadura líquida, (c) Reacción del metal-base con soldadura líquida para formar la capa de compuestos intermetálicos [2].	40
2.34	Perfil de reflujo para soldadura Sn-Ag-Cu vs soldadura Sn-Pb.	43
3.1	Partes de la elipse.	47
3.2	Trazo de rayos principales en una lente.	49
3.3	Lentes convexas. (a) plano-convexa, (b) biconvexa, (c) menisco convergente.	51
3.4	Lentes colectando y colimando luz de una fuente.	52
3.5	Lentes cóncavas. (a) plano-cóncava, (b) bicóncava, (c) menisco divergente.	54
3.6	Efectos de la aberración esférica en una lente.	54
3.7	Lente asférica colimando rayos de una fuente puntual.	55
3.8	Esparcimiento al centro de la superficie de un difusor.	56
3.9	Distribución de intensidad de un difusor de vidrio esmerilado [32].	57
3.10	Matriz de multi-lentes.	58
3.11	Cambio de distribución gaussiana a superficie plana.	59
3.12	Transmisión, reflexión, y absorción de un haz incidente sobre una superficie.	61
3.13	Interferencia de dos ondas: (a) constructiva y (b) destructiva.	62
3.14	Anulación de los haces al ser colocada una película delgada sobre un sustrato.	63
3.15	Ángulo sólido obtenido de la distribución de flujo esférico proveniente de una lámpara.	66
3.16	Ciclo regenerativo del Halógeno.	69
3.17	Distribución espectral de un cuerpo negro.	72
4.1	Trazo de rayos del reflector elíptico.	77
4.2	Diseño del reflector elíptico, (a) cara exterior, (b) con perspectiva.	78
4.3	Diseño del filamento.	79
4.4	Espectro de emisión de lámparas QTH de 100W, 150W y 200W.	80
4.5	Ventana de transmisión del material UV SiO ₂ .	83
4.6	Lente asférica utilizada en el simulador Zemax TM .	84
4.7	Arreglo básico propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) lente condensadora, (c) lente secundaria, (d) detector.	85
4.8	Lente secundaria utilizada en el simulador Zemax TM .	86
4.9	Trazo de rayos del arreglo básico propuesto para FILSS	87

	generado en el simulador Zemax TM .	
4.10	Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo básico para FILSS.	89
4.11	Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) difusor, (c) lente condensadora, (d) lente secundaria, (e) detector.	90
4.12	Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) lente condensadora, (c) lente divergente, (d) arreglo de multi-lentes, (e) lente de campo, (f) detector.	91
4.13	Matriz de multi-lentes utilizada en el simulador Zemax TM .	93
4.14	Ventana de transmisión del material B270.	94
4.15	Trazo de rayos del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesta para FILSS generado en el simulador Zemax TM .	95
4.16	Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.	95
4.17	Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) lente condensadora, (c) lente divergente, (d) doble matriz de multi-lentes, (e) lente de campo, (f) detector.	97
4.18	Trazo de rayos del arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS generado en el simulador Zemax TM .	98
4.19	Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.	99
5.1	Fotografía del arreglo básico para FILSS.	102
5.2	Fotografía del arreglo con difusor de vidrio esmerilado para FILSS.	102
5.3	Fotografía del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes para FILSS.	102
5.4	Fotografía del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes para FILSS.	103
5.5	Diagrama a bloques del arreglo experimental para obtención de distribución de luz.	104
5.6	Diagrama a bloques del arreglo experimental para obtención de distribución de temperatura.	106
5.7	Colocación de los termopares en el componente BGA para medición de temperaturas.	109
5.8	Mancha de luz obtenida del arreglo básico para FILSS.	110
5.9	Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo básico graficada en Matlab.	110
5.10	Mancha de luz capturada en la cámara CCD del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado para FILSS.	111
5.11	Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado graficada en Matlab.	112
5.12	Mancha de luz capturada en la cámara CCD del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes para FILSS.	112
5.13	Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes graficada en Matlab.	113
5.14	Mancha de luz capturada en la cámara CCD del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes para FILSS.	113
5.15	Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes graficada en Matlab.	114
5.16	Perfil de temperatura por reflujo utilizado en el arreglo básico propuesto	

	para FILSS.	115
5.17	Imagen termo-grafica capturada en el arreglo básico con ThermaCAM TM .	116
5.18	Distribución de temperatura del arreglo básico.	117
5.19	Imagen termo-gráfica capturada en el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado con ThermaCAM TM .	117
5.20	Distribución de temperatura del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado.	118
5.21	Imagen termo-grafica capturada en el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes con ThermaCAM TM .	119
5.22	Distribución de temperatura del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes.	119
5.23	Imagen termo-grafica capturada en el arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes con ThermaCAM TM .	120
5.24	Distribución de temperatura del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes.	121
5.25	Reflexión en películas antirreflectoras NIR II [39].	125
5.26	Transferencia de calor por radiación y conducción dadas en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.	128

Índice de tablas

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
2.1 Valores de CET a temperatura ambiente para materiales de Montaje Superficial.	41
2.2 Temperaturas utilizadas en cada una de las etapas del perfil de reflujo para soldadura con plomo y sin plomo.	43
3.1 Comparación entre unidades radiométricas.	68
3.2 Emisividad total del Tungsteno.	73
4.1 Espectro de emisión de la lámpara.	82
4.2 Distancias de separación entre elementos en el arreglo básico para FILSS.	87
4.3 Distancias de separación entre elementos en el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado para FILSS.	90
4.4 Distancias de separación entre elementos en el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.	94
4.5 Distancias de separación entre elementos en el arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.	97
5.1 Elementos ópticos utilizados en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.	101
5.2 Características de cámara CCD para captura de la mancha de luz.	104
5.3 Características de la cámara termo-gráfica ThermoCAM E25.	105
5.4 Parámetros de configuración definidos en la cámara termo-gráfica ThermoCAM E25.	106
5.5 Características del termómetro de 4 canales utilizado para medir la transferencia de calor.	107
5.6 Análisis estadístico de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.	122
5.7 Transmitancia total y pérdidas por reflexión obtenidas de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.	124
5.8 Transmitancia total y las pérdidas por reflexión obtenidas de los arreglos ópticos propuestos para FILSS cuando son aplicadas películas antirreflectoras.	126
5.9 Comparación de temperaturas entre los arreglos ópticos propuestos para FILSS al ser agregadas películas antirreflectoras.	127
5.10 Análisis de transferencia de calor por radiación para los arreglos ópticos propuestos para FILSS.	130
5.11 Análisis de transferencia de calor por conducción obtenida en el BGA utilizado en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.	131

ACRÓNIMOS Y GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aberración: imperfección de un sistema o elemento óptico.

Aproximación paraxial: pequeños ángulos formados en sistemas ópticos con respecto al eje óptico.

BGA: por sus siglas en inglés, Ball Grid Array, Arreglo de Bolas de soldadura.

Board: Placa.

CET: Coeficiente de Expansión Térmica.

CI's: Circuitos Integrados.

CSP: por sus siglas en inglés, Chip Scale Package, Paquete a Escala de Chip.

Epóxico: también llamado resina, es un material que al ser mezclado con un catalizador este se endurece.

FILSS: por sus siglas en inglés, Focused Infrared Light Soldering System, Sistema Soldador por luz infrarroja enfocada.

Flux: fluido de limpieza utilizado en el proceso de soldadura de componentes electrónicos.

IMC: por sus siglas en inglés, Intermetallic component, componente intermetálico.

IR: Infrarrojo.

LCCC: por sus siglas en inglés, Leadless Ceramic Chip Carrier, Soporte de Chip de Cerámica sin Plomo.

PCB: Por sus siglas en inglés, Printed Circuit Board, Placa de Circuito Impreso en donde son colocados los componentes electrónicos.

PLCC: por sus siglas en inglés, Plastic Leaded Chip Carrier, Soporte de Chip de Plomo Plástico.

QFP: por sus siglas en inglés, Quad Flat Pack, Encapsulado de Cuadro Plano.

QTH: por sus siglas en inglés, Quartz Tungsten Halogen, Cuarzo Tungsteno Halógeno.

SMC: Por sus siglas en inglés, Surface Mount Component, Componente de Montaje Superficial. Tecnología en la que los componentes electrónicos son colocados sobre la placa de circuito impreso.

SMT: Por sus siglas en inglés, Surface Mount Technology, llamada Tecnología de Montaje Superficial.

Sn-Ag-Cu: aleación de Estaño-Plata-Cobre.

Sn-Pb: aleación de Estaño-Plomo.

SOIC: por sus siglas en inglés, Small-Outline Integrated Circuit, Circuito Integrado de Contorno Pequeño.

THC: Por sus siglas en inglés, Trough-Hole Componente, componente de tecnología de orificio. Tecnología en la que los componentes electrónicos son colocados atravesando una placa de circuito impreso.

THT: Por sus siglas en inglés, Trough-Hole-Technology, llamada Tecnología de orificio.

TSOP: por sus siglas en inglés, Thin Small-Outline Package, Empaquetado Delgado de Contorno Pequeño.

Pad: Superficie o bloque designado para un contacto eléctrico.

FC: por sus siglas en inglés, Flip Chip, también conocido como conexión de chip de colapso controlado.

Capítulo 1

Introducción

Una cualidad con la que cuenta el ser humano es que siempre ha buscado el satisfacer sus necesidades y resolver una amplia gama de problemáticas, las cuales pueden variar y ser desde muy simples, hasta muy complejas. Una manera de satisfacer y solucionar estas problemáticas ha sido con la invención de aparatos mecánicos, eléctricos y electrónicos, los cuales contaban en años atrás, con las características de ser robustos, de gran tamaño, costosos y que solo podían resolver un solo problema en un lapso de tiempo relativamente largo. Sin embargo, debido a la necesidad de contar con sistemas más sencillos y prácticos, en las últimas décadas, se han desarrollado y mejorado, de manera acelerada, sistemas o aparatos electrónicos los cuales pueden resolver múltiples problemas y trabajar a altas velocidades de procesamiento, además de contar con una gran capacidad de almacenamiento con complejas aplicaciones, portátiles, de tamaño reducido y con bajo costo [1-2]. Por este motivo la industria manufacturera de componentes electrónicos ha tenido que ir avanzando de una manera muy acelerada. Estos avances en la tecnología han permitido que áreas como las comunicaciones, medicina, aeroespacial, entre otras, ofrezcan los servicios requeridos por la misma industria y por el ser humano. Un ejemplo muy claro de cómo ha sido la evolución en los aparatos electrónicos en el área de las comunicaciones, es el teléfono desarrollado por Alexander Graham Bell, el cual era un aparato robusto, fijo y con conexión física por medio de un cable, con relativa dificultad para operar, en el que solo se podía dar la comunicación de un punto a otro por medio de un operador, con señal de baja calidad de transmisión y recepción. En la actualidad este ha evolucionado y se ha convertido en uno de los aparatos más utilizados en el mundo, gracias a que cuenta con características como conexión inalámbrica, bajo costo, capacidad para ser

móvil, como es el caso del celular, así como con una gran variedad de aplicaciones. Otros ejemplos de estos avances son: la televisión a blanco y negro que trabajaba por medio de bulbos evolucionando a ser una televisión a colores, la cual su funcionamiento interno se encuentra constituido por circuitos integrados; la computadora, la cual ha sido mejorada y la podemos encontrar en su forma portátil como laptops, tabletas electrónicas, etc. Sin embargo, también se ha observado que, con el incremento en el desarrollo y uso de estos aparatos electrónicos, se ha incrementado la contaminación generada al medio ambiente [3]. Una de las causas de la contaminación generada en el mundo, es el plomo que se desprende de la pasta de soldadura utilizada para soldar los componentes electrónicos o circuitos integrados CI, sobre placas de circuito impreso o PCB (por sus siglas en inglés: Printed Circuit Board), el cual crea problemas de salud en el ser humano como lo son la anemia y lesiones al sistema nervioso, así como daños al medio ambiente, ya que al contar con altas concentraciones de plomo en la tierra, agua y aire, todo ser vivo se ve afectado por este [3-9].

Por tal motivo, en las últimas décadas se han desarrollado componentes electrónicos los cuales puedan satisfacer y cumplir las necesidades del ser humano, como lo son la miniaturización y complejidad, además que en el ensamble de estos mismos sea evitado el uso del plomo, ayudando de esta manera a reducir la contaminación generada por éste en el medio ambiente. Por otro lado, la pasta de soldadura sin plomo, requiere un incremento de temperatura entre 30° y 70°C para lograr que ésta llegue a su punto de fusión, teniéndose que tener mucho cuidado en la distribución de temperatura que incide sobre los componentes electrónicos más pequeños, ya que una variación muy abrupta puede provocar un mal funcionamiento o daño.

Una tecnología que cumple con las tendencias de los productos electrónicos de consumo masivo que requieren miniaturización en los componentes electrónicos, con alta capacidad de procesamiento y almacenamiento, es la Tecnología de Montaje Superficial, SMT (por sus siglas en inglés: Surface Mount Technology). En la SMT, los componentes electrónicos pueden ser colocados sobre el PCB, sin requerir perforación de éste para poder ser soldado, permitiendo que ambos lados sean utilizados.

SMT junto con la tecnología de integración (VLSI por sus siglas en inglés: Very Large Scale Integration), tienen un papel muy importante en el desarrollo de nuevos

productos electrónicos [1-2,10]. Uno de los principales retos tecnológicos para SMT y VLSI es el proceso de soldadura de los circuitos integrados que se basan en estas tecnologías, ya que las uniones de soldadura de sus terminales son muy pequeñas (menos de 1 mm de diámetro) y tienen una gran concentración de éstas en un área reducida. Además de esto, hay muy baja accesibilidad a las uniones de soldadura debido a que éstos se encuentran en algunos casos por debajo del Circuito Integrado (CI), como lo es para el arreglo de bolas de soldadura BGA (por sus siglas en inglés: Ball Grid Array), el cual es uno de los componentes electrónicos mayormente utilizados en una gran variedad de dispositivos [11-20]. El método de soldadura requerido para CI de SMT es el método de reflujo en el que los dispositivos SMT que se requieren soldar, se calientan siguiendo un perfil de temperatura adecuada proporcionada por un elemento calefactor controlado. Las cuatro principales etapas de calentamiento del proceso de reflujo son el pre-calentamiento, pre-reflujo, reflujo y enfriamiento [21-24]. Es necesario que se cumplan con las cuatro etapas del reflujo, ya que de no ser así, se pueden crear problemas con la soldadura como puentes, efecto lápida, soldadura fría, entre otros problemas, no permitiendo el correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

El mecanismo de transferencia de calor más comúnmente utilizado en el método de soldadura por reflujo es por convección de flujo de aire caliente, en el cual se tiene una combinación de un elemento calefactor el cual es una resistencia eléctrica y un ventilador que proporciona el flujo de aire [22-23]. Las principales ventajas de esta técnica son su relativa simplicidad, robustez para el entorno industrial, y relativamente buen control de temperatura en el dispositivo SMT durante el proceso de soldado. Presenta el inconveniente de un alto consumo de energía eléctrica, por lo general más de 1000 watts. Otra posible desventaja adicional a ésta es que continúa la tendencia a la miniaturización de los componentes SMT, por lo que la fuerza de impulso generado en el flujo de masa de aire del sistema, puede dar lugar a una mala alineación de éstos, debido a su muy bajo peso, durante el proceso de soldadura.

Otro mecanismo de transferencia de calor del proceso de soldadura por reflujo utilizado para componentes SMT es el de radiación infrarroja. En este proceso la radiación infrarroja es proporcionada por una lámpara de emisión de longitud de onda de banda ancha, con pico de emisión de radiación en la región infrarroja IR del espectro. La

tecnología infrarroja proporciona una técnica fiable para el montaje de productos electrónicos [21-22, 24-29], utilizando dos modos de transferencia de calor, los cuales son la radiación IR y conducción. El modo de transferencia de calor por radiación se da con la emisión de luz IR de la lámpara hacia el CI, en cambio el modo por conducción sucede al tener la absorción de la radiación en los materiales utilizados para encapsular el CI metal-semiconductor, el cual genera calentamiento en todo el cuerpo del CI, transfiriéndose este calor a las uniones de soldadura del dispositivo SMT que va a ser soldado. Una de las principales ventajas de la tecnología infrarroja es que se tiene un control muy preciso en la distribución de la temperatura y una alta capacidad para el aumento de la temperatura máxima requerida para fundir diferentes aleaciones de soldadura, que actualmente representan un requisito fundamental para el uso de soldadura libre de plomo en los productos electrónicos, lo cual ya es un requisito de cuidado ambiental regulado internacionalmente para el desarrollo de nuevos productos con tecnología ambiental [2-7]. Además, el consumo de energía eléctrica de la lámpara infrarroja es mucho menor que la del sistema de flujo de aire caliente.

La técnica de soldadura por reflujo para dispositivos SMT se aplica por lo general simultáneamente a varios componentes colocados en las superficies de PCB, por medio de la utilización de un horno a una temperatura controlada de múltiples etapas y un transportador [1-2,25]. Además de este sistema, también se requiere una estación de re-trabajo de componentes electrónicos, con el fin de tener la capacidad de soldar o retirar componentes individuales SMT.

Sin embargo, la industria electrónica, ha requerido del diseño de una técnica la cual permita retirar un solo componente electrónico soldado sobre una placa de circuito impreso, debido a mal funcionamiento o que se encuentre dañado, y volver a colocar un nuevo componente electrónico en su lugar. A esta técnica de remover y colocar dispositivos electrónicos es llamado re-trabajo, y es lograda por medio del correcto direccionamiento de calor hacia el componente colocado en el PCB.

En la actualidad, en el mercado podemos encontrar diferentes sistemas para el re-trabajo de componentes SMT [21-26], en los que los sistemas de flujo de aire caliente y por radiación IR son los preferidos para el re-trabajo de BGA's.

Los sistemas de flujo de aire caliente, funcionan por medio de la fijación de un conducto de metal de la fuente de aire caliente con salida al BGA. Este método de direccionamiento de la energía de calor tiene bajo costo, sin embargo, una parte de la energía de calor no llega al BGA, ya que permanece en las paredes del conducto de metal. Además, si la velocidad de flujo de aire se incrementa para la obtención de una mayor temperatura, el impulso de la masa de aire aumentará, incrementando el riesgo de que se tenga una desalineación debido al bajo peso en el BGA y a la miniaturización de los componentes que cada vez es mayor.

Para el sistema de re-trabajo con radiación de luz IR, una configuración de elementos ópticos es utilizada para enfocar la luz IR hacia el BGA a soldar o eliminar del PCB. Se han desarrollado previamente varias estaciones de re-trabajo de BGA [22-26], donde el rendimiento de control de la temperatura y uniformidad sobre el área del BGA es mejor que las estaciones de re-trabajo de flujo de aire caliente, así como un menor consumo de energía eléctrica. Una desventaja de este sistema basado en IR es que requiere el reemplazo de la lente de salida, con la finalidad de obtener diferentes áreas de superficie del BGA. Un diseño de la configuración óptica óptima debe proporcionar un alto rendimiento en el control y la distribución de la temperatura, así como un control en la mancha de luz de salida para diferentes superficies del BGA, incluso para μ BGA y las últimas tecnologías VLSI [10].

Entre algunos sistemas que utilizan la tecnología de IR, se encuentran: a) calentador enfocado basado en uno o múltiples reflectores parabólicos o elípticos para concentrar la energía de la lámpara IR a un área bien definida de la placa, b) un calentador no enfocado basado en un arreglo de lámparas IR y espejos planos para producir una área uniforme de calor sobre la placa, y c) sistema de iluminación que consiste de un calentador enfocado basado en un reflector parabólico y un sistema condensador para producir irradiación de energía de la lámpara a una bien definida área sobre la placa [1-2,21-26].

Por lo que en este trabajo de tesis, considerando que el proceso de soldadura de componentes SMT utilizando luz IR enfocada es un elemento importante e indispensable en el estado del arte de la fabricación de productos electrónicos se presenta un estudio teórico-experimental de un prototipo soldador de dispositivos SMT utilizando luz IR enfocada. El propósito de este sistema es el crear una distribución uniforme de temperatura

en el dispositivo SMT específicamente del tipo BGA que se desea re-trabajar. Para el conocimiento del autor, existe poca información del sistema óptico usado en tecnología de soldadura por luz IR o refusión, el principio de operación de transferencia de calor y su relación con la irradiancia y la distribución de temperatura del sistema cuando es aplicado a circuitos integrados, el cual fue considerado como un tema importante a investigar. Adicionalmente, se presenta un trabajo original del diseño de un sistema óptico que permite generar una irradiancia uniforme y por tanto una distribución de temperatura uniforme sobre el dispositivo. En este trabajo se presenta un análisis de cuatro sistemas ópticos para soldar dispositivos SMT, específicamente para circuitos tipo BGA, basándose en sistemas de iluminación los cuales ofrecen una distribución espacial de luz uniforme. Las aportaciones obtenidas de esta tesis son el análisis de la irradiancia de salida de cada uno de los arreglos ópticos, la distribución de temperatura emitida por cada arreglo, así como un análisis de la transferencia de calor en los arreglos ópticos y en el dispositivo BGA que se desea re-trabajar.

A continuación se describe la estructura principal que compone a este trabajo de tesis. En el capítulo 1 se presentó una introducción en la que se da un panorama general de la problemática encontrada al re-trabajar componentes electrónicos BGA's. En el capítulo 2 se presenta información de la Tecnología de Montaje Superficial (SMT), que tipos de SMT existen, cual es el proceso de soldadura de estos componentes y los problemas que podemos encontrar al soldar; así como las características de las nuevas aleaciones de soldadura sin plomo. En el capítulo 3 se dan los fundamentos de óptica, específicamente de óptica geometría y radiometría, los cuales son necesarios para el desarrollo del prototipo soldador óptico para re-trabajo de componentes BGA's. En el capítulo 4 se describen los diferentes arreglos propuestos como prototipos soldadores de componentes BGA's, así como las simulaciones desarrolladas con la finalidad de confirmar la teoría. El capítulo 5 muestra los experimentos realizados, la caracterización de los arreglos ópticos y los resultados obtenidos de distribución espacial de luz o irradiancia, análisis termo-gráfico a la salida del sistema y la transferencia de calor en el arreglo óptico y en el BGA. Como parte final de este trabajo son presentadas las conclusiones en el capítulo 6.

Capítulo 2

Tecnología de Montaje Superficial (SMT)

En el presente capítulo se presenta la tecnología que utiliza los componentes electrónicos SMT, sus técnicas de soldado, así como los problemas que pueden ser encontrados en el proceso de soldado.

2.1 Historia

Durante muchos años la tecnología de orificio “THT” (por sus siglas en inglés: Trough-Hole Technology) fue utilizada para colocar componentes electrónicos en placas de circuito impreso “PCB” (por sus siglas en inglés: Printed Circuit Board) permitiéndonos tener una gran variedad de aparatos, como radio y televisión. Sin embargo, esta tecnología requería, como lo dice su nombre, de orificios para introducir los componentes a interconectar en el PCB, provocando que solo fuera utilizado un lado de este. Por lo que, al necesitar de altas densidades de componentes electrónicos para su procesamiento, las dimensiones de los aparatos tenían que ser grandes, además de complicados mecanismos para realizar las actividades del sistema.

Así fue como a mediados de 1960 emerge la Tecnología de Montaje Superficial “SMT” (por sus siglas en inglés: Surface Mount Technology) ofreciendo la ventaja de poder colocar los componentes directamente en la superficie del PCB, sin que las terminaciones penetren en el lado opuesto, y por consiguiente permitiendo utilizar ambos lados del PCB. Pero no fue hasta finales de los años 70’s cuando la tecnología SMT fue incrementando su uso y desarrollo, ofreciendo un alto grado de automatización, alta densidad de circuitos, pequeño volumen, bajo costo y mejor desarrollo. Esto es de interés

particular en circuitos integrados para aplicaciones aeroespaciales y dispositivos electrónicos portátiles de consumo masivo [11-20]. En la figura 2.1 se muestra el esquemático de tecnologías THT y SMT en un PCB.

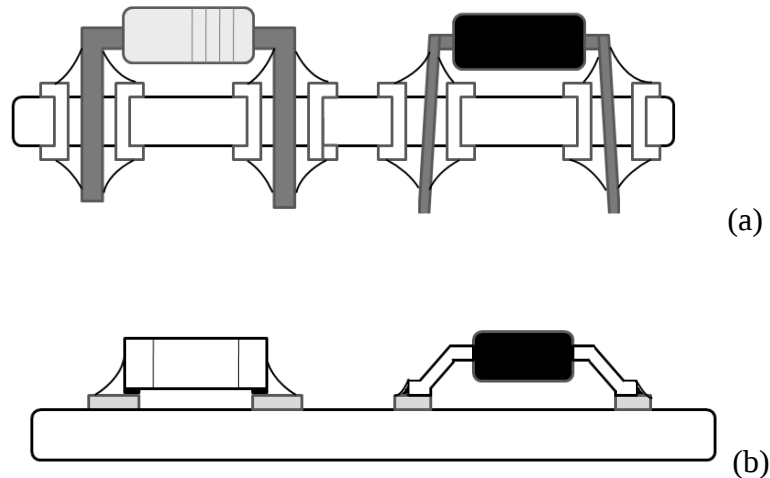


Figura 2.1. Esquemático de tecnologías en un PCB: (a) Componentes de la tecnología THT atravesando un PCB, (b) Componentes de la tecnología SMT montado sobre un PCB [2].

2.1.1 Componentes de Montaje Superficial.

Los Componentes de Montaje Superficial “SMC’s” (por sus siglas en inglés: Surface Mount Components) los podemos encontrar en cualquier tipo de aplicación, como capacitores, inductores, resistores, transistores, diodos, Circuitos Integrados CI’s y conectores.

Sin embargo, debido a su restricción impuesta por los procesos de montaje superficial, muchos SMC’s son diseñados para disipación de potencia no mayor de 1 a 2 watts.

A continuación se presentan los diferentes componentes que pueden ser encontrados en la tecnología de montaje superficial SMT.

Resistores en chip.

Un resistor es el SMC más simple. Consiste de un cuerpo de sustrato de cerámica rectangular, con una terminación metalizada, usualmente plata-paladio (Pd-Ag) en ambas terminales.

Capacitores en chip.

Los capacitores SMC son los más comúnmente usados y es un chip de cerámica multicapas, también llamado chip de gorro o gorro de cerámica.

Inductores de chip.

Los inductores de chip emplean un núcleo de material de cerámica o ferrita alrededor, vertical u horizontalmente por una guía de cobre fina. El chip es usualmente colocado en una resina epóxica para facilitar el manejo automático.

Semiconductores discretos.

En los semiconductores discretos de montaje superficial encontramos diodos y transistores los cuales utilizan tipos similares de empaquetado.

Circuitos integrados.

Los circuitos integrados (CI's) de montaje superficial se encuentran disponibles en una gran variedad de empaquetados. En estos se incluyen los circuitos integrados Small-Outline (SOIC), el empaquetado Thin Small-Outline (TSOP), Plastic Leaded Chip Carrier (PLCC), Leadless Ceramic Chip Carrier (LCCC), Quad Flat Pack (QFP) y el Ball Grid Array (BGA).

Además de la variedad de empaquetados que podemos encontrar existen diferentes terminaciones de los empaquetados de CI's, las cuales podemos dividir en 5 categorías.

La primera de ellas es el empaquetado con terminaciones en ala, que es la configuración más popular. Se utiliza en aplicaciones donde se requiere una colocación fina y ultra fina. Sin embargo estas terminaciones son susceptibles al daño, como doblarse o barrerse en su manejo.

La segunda categoría es la terminación en J (J-Lead), la cual ofrece mejor manejabilidad, sin embargo resulta difícil su re-trabajo, inspección y formación de las terminaciones.

La tercera categoría son las terminaciones en tapa, que son más fáciles de manufacturar que ala y J-Lead. Sin embargo, el uso de terminaciones en tapa no es tan popular como las de terminación en ala.

El portador de chip de cerámica sin plomo posee problemas en la unión, principalmente debido a su bajo coeficiente de expansión térmica CET (CTE por sus siglas en inglés: Coefficient of Thermal Expansion) de los empaquetados y materiales del PCB.

En el empaquetado BGA son utilizadas bolas de soldadura debajo del empaque para ser soldado en el PCB a través del uso de pasta de soldadura, con un punto de fusión alto. En la figura 2.2 se muestran las diferentes configuraciones de terminaciones de los empaques de CI.

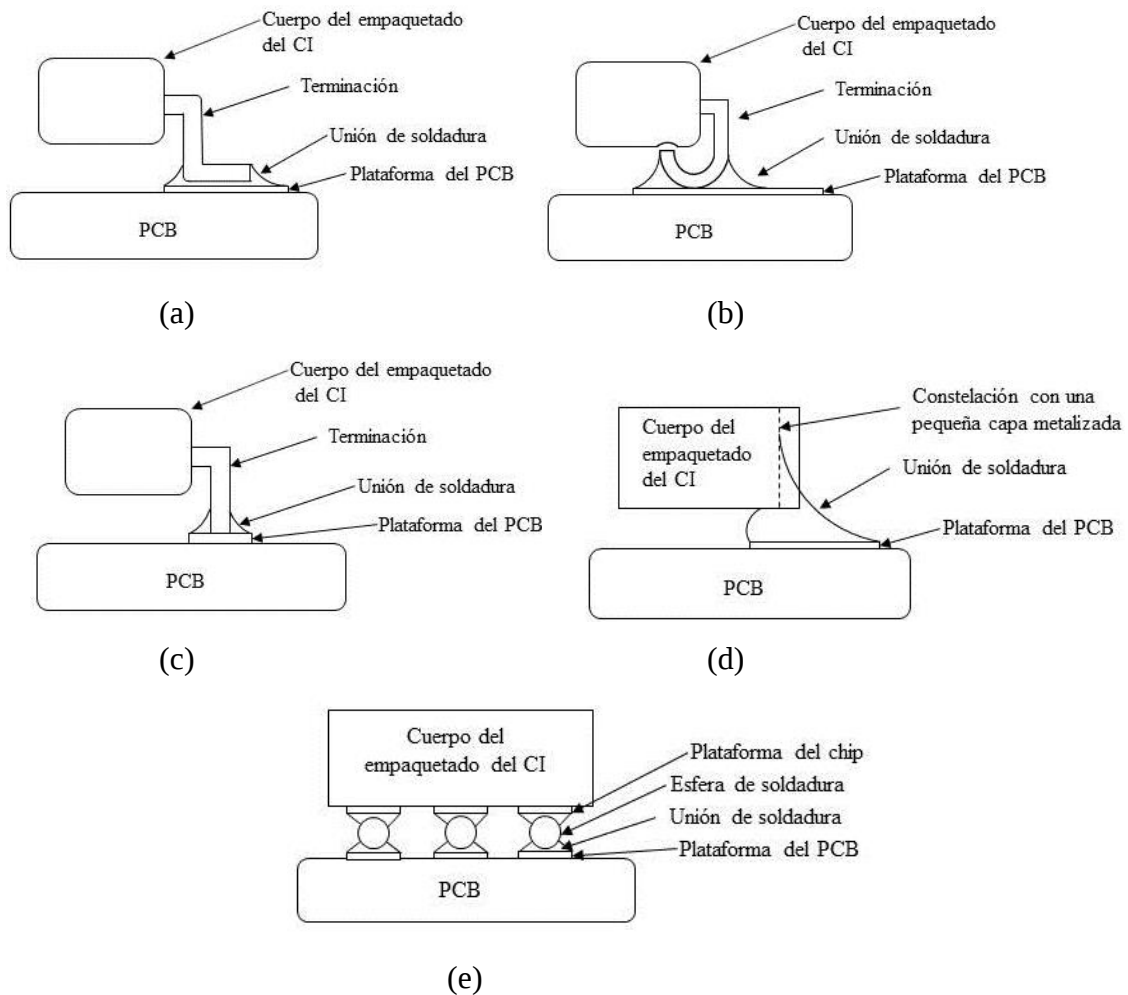


Figura 2.2. Configuraciones de terminaciones de los empaques de CI. (a) ala; (b) Terminación J; (c) Terminación en tapa; (d) Metalización sin terminaciones; (e) Terminación bola [2].

2.1.2 Tipos de tecnologías de ensamble de Montaje Superficial

Los Componentes de Montaje Superficial (SMC's) pueden ser ensamblados sobre los PCB con el uso de métodos como los son la soldadura de pasta por reflujo, soldadura de ola o procesos de curación de adhesivos conductivos.

Sin embargo, se requiere conocer en el proceso de ensamble, cuál de las tres categorías de ensamble va a ser utilizada, para así determinar el método para soldar sobre el PCB. A continuación son explicadas estas tres categorías de ensamble.

2.1.2.1 Tipo I

En el tipo I, el board o placa de montaje superficial tiene SMC's por ambos lados. El primer lado típicamente usa pasta de soldadura para unirse. El segundo lado también usa pasta de soldadura, particularmente si se cuenta con componentes de unión fina. Durante el primer reflujo son soldados los componentes en la parte superior de la placa. En el segundo reflujo, el pre-ensamble de las uniones de soldadura del primer reflujo debajo del PCB pueden ser fundidas de nuevo. La tensión superficial de la soldadura en general es suficiente para mantener los componentes suspendidos en el lugar durante el segundo reflujo. Dependiendo de la química del flux o fluido, la limpieza puede o no ser necesaria. En la figura 2.3 se muestra el esquemático de la placa de montaje superficial tipo I.

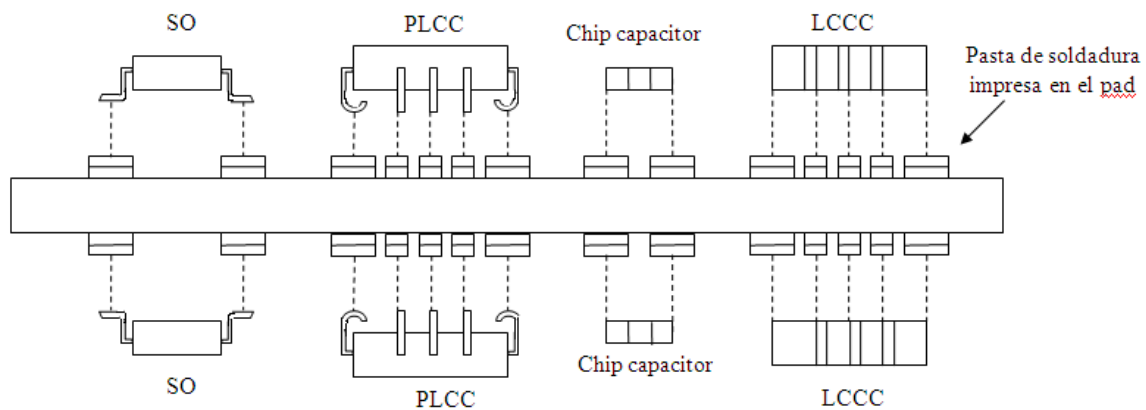


Figura 2.3. Esquemático de la placa de montaje superficial tipo I [2].

2.1.2.2 Tipo II

Las placas del tipo II tienen ambas tecnologías SMC's y THC's en un lado de la placa y componentes de chip en el otro lado. Normalmente los SMC's son unidos por soldadura de reflujo, siguiéndole la soldadura de ola para componentes THC's y chips. Cuando es utilizada soldadura de ola, tienen que ser utilizados adhesivos para asegurar los componentes SMC en el lugar, como se muestra en la figura 2.4, en los capacitores de la parte inferior. Los THC's pueden ser insertados después de que el adhesivo ha sido curado. El diseño del tipo II requiere el uso de soldadura por reflujo y soldadura de ola, por lo que se complica el ensamble, prueba y re-trabajo.

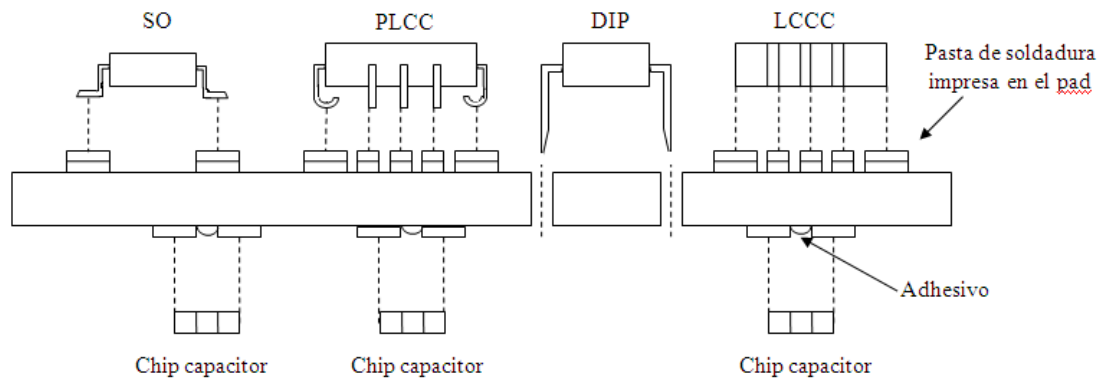


Figura 2.4. Esquemático de la placa de montaje superficial tipo II [2].

2.1.2.3 Tipo III

En el tipo III la placa tiene componentes THT en un lado y componentes de chip por el otro. El tipo III requiere solamente soldadura de ola para el proceso de unión y representa el inicio para cambiar de la tecnología "Through-hole" a Tecnología de Montaje Superficial. En la figura 2.5 se muestran la colocación de los componentes en el tipo III.

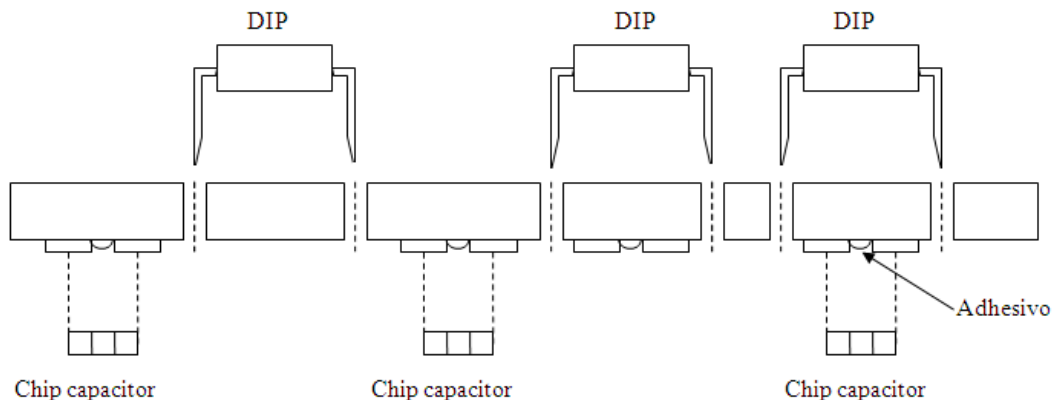


Figura 2.5. Esquemático de la placa de montaje superficial tipo III [2].

2.1.3 Procesos de soldadura de Montaje Superficial

Como ya se mencionó anteriormente existen dos principales procesos de soldadura: la soldadura de ola y la soldadura por reflujo.

2.1.3.1 Soldadura de ola.

La soldadura de ola es un tipo de soldadura de flujo, utilizado en la tecnología de Through-hole. Los PCB's con THC's insertados son pre-pasteados, después son pasados por una ola de pasta de soldadura. La presencia de SMC's en la parte inferior del PCB interfiere con la laminación del flujo de soldadura, y consecuentemente resulta en un efecto de sombreado. Para minimizar el efecto de sombreado, es utilizada una doble ola, una ola turbulenta y una ola laminar. La ola turbulenta asegura la unión de las terminaciones, mientras que la ola subsecuente remueve el exceso de soldadura para minimizar los puentes entre las terminaciones. El choque térmico es manipulado implementando suficiente precalentamiento antes de la soldadura de ola. En la figura 2.6 se muestra el proceso de soldadura de doble ola.

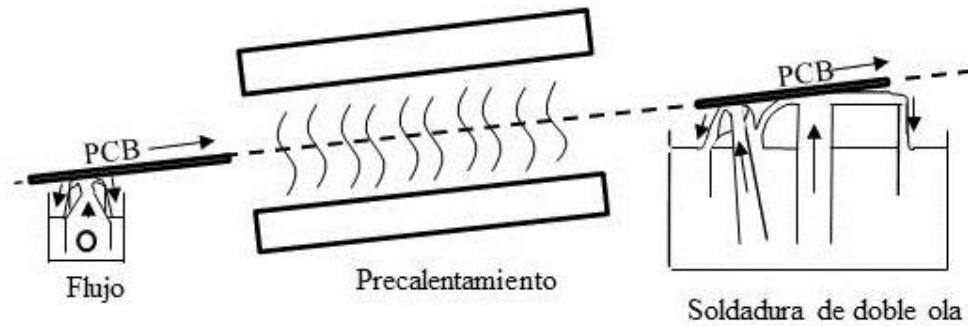


Figura 2.6. Proceso de soldadura de doble ola [2].

2.1.3.2 Soldadura de reflujo

Para eliminar los problemas encontrados en la soldadura de ola al contar con SMC's, es utilizada la soldadura de reflujo. En ésta, el polvo de soldadura y la pasta (o flux) son colocados para formar la pasta de soldadura. Este material es entonces depositado, a través de un esténcil impreso en los blocks o pads del PCB. Después las placas son calentadas por debajo de la temperatura de fusión de la soldadura líquida necesaria para obtener el reflujo del polvo de soldadura. A esta temperatura el flux reacciona y remueve el óxido de las terminaciones y el polvo de soldadura, y consecuentemente permite las uniones de la soldadura, paso indispensable para que ocurra la unión metalúrgica. Entre algunos métodos de reflujo comúnmente usados encontramos: reflujo por infrarrojo, reflujo en fase de vapor, reflujo por convección, reflujo por conducción, y soldadura laser.

2.1.3.2.1 Reflujo por infrarrojo

En el reflujo por infrarrojo (IR) es utilizado un emisor IR o fuente de luz IR, en el cual se pueden abarcar longitudes de onda del espectro electromagnético que van desde la región del ultravioleta hasta el IR lejano. Las longitudes de onda que abarca la fuente de luz IR, son dependientes del tipo de emisor utilizado. Las ventajas de los sistemas por reflujo IR son:

- La luz IR incide directamente sobre el encapsulado.
- No se crea sombreado.
- Se cuenta con control de temperatura del sistema.
- Se obtiene uniformidad de temperatura sobre los dispositivos.

- No crea problemas de lápida.
- Los sistemas por IR no crea problemas con el medio ambiente.
- No es necesario precalentamiento o secado de la pasta de soldadura.

La forma en cómo se transfiere el calor (transferencia de calor) en el proceso de reflujo por infrarrojo, es por radiación. Esto ocurre cuando un cuerpo se encuentra con una energía calorífica mayor (en este caso el emisor IR o Fuente de luz IR), y es transferida al cuerpo con menor energía calorífica (SMC) [2].

La tasa de calor Q_{IR} que se obtiene del método de reflujo por infrarrojo, puede expresarse matemáticamente como en (2.1):

$$Q_{IR} = V * \varepsilon_s * \alpha_T * \sigma * (T_s^4 - T_T^4) \quad (2.1)$$

donde V es el factor de forma, ε_s es la emisividad de la fuente, α_T es la absorción del SMC, σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2/\text{°K}^4$), y finalmente T_s y T_A son las temperaturas en la fuente y en el SMC, respectivamente.

Otro modo de transferencia de calor que se encuentra involucrado durante el proceso de reflujo por infrarrojo, es la transferencia de calor por conducción en el SMC. La conducción se presenta al incidir la luz IR en la superficie del componente electrónico, transfiriéndose este calor al otro extremo del dispositivo.

La tasa de calor Q_c que se presenta en la conducción es dada por (2.2):

$$Q_c = K * A(T_1 - T_2) / \Delta X \quad (2.2)$$

donde K es la conductividad térmica, A es el área de sección transversal, T_1 la temperatura del punto 1 o área en la que incide la luz IR, T_2 la temperatura en el punto 2 o área a donde se transfirió la energía del punto 1 y ΔX el grosor del material entre los puntos 1 y 2.

2.1.3.2.2 Reflujo por fase de vapor

El reflujo por fase de vapor se obtiene cuando se llega al punto de fusión de un fluido en un ambiente libre de oxígeno. Algunas de las ventajas son:

- Los resultados del reflujo no se ven afectados por la configuración y la colocación de los componentes.
- No se tiene sobrecalentamiento o uniones frías si se sigue el tiempo correcto en el reflujo.
- Este método es particularmente usado para reflujo de productos de bajo volumen y mezclas de productos.

Sin embargo, el efecto lápida y/o el rompimiento de chips, que se explican más adelante, pueden ser un problema asociado al rápido calentamiento del proceso de soldadura por fase de vapor [2].

La tasa de calor Q_{fv} obtenida en el reflujo por vapor de fase puede ser expresada como en (2.3):

$$Q_{fv} = H * A_A (T_s - T_A) \quad (2.3)$$

Donde H es el coeficiente de transferencia de calor del vapor, A_A es el área de ensamble, T_s y T_A son las temperaturas de vapor saturado y de ensamble, respectivamente.

2.1.3.2.3 Reflujo por convección de aire forzado

Este método utiliza gas caliente para transmitir el calor a las partes a soldar. En el proceso de reflujo por aire, el aire caliente puede oxidar la pasta de soldadura, causando así bolas no deseadas de soldadura. Para pastas de soldadura con insuficiente fluido de limpieza, es utilizada una atmosfera de reflujo con nitrógeno, el cual puede reducir el tamaño de las bolas de soldadura.

Las ventajas de reflujo por convección de aire forzado son:

- Bajo costo en producción y equipamiento
- Todos los objetos son calentados uniformemente
- La baja transferencia de calor minimiza el rompimiento de los componentes.

- La transferencia de calor permite un adecuado precalentamiento del flux.

La tasa de calor Q para el reflujo por convección es expresada como en (2.4):

$$Q = H_C * A_s (T_g - T_s) \quad (2.3)$$

donde H_C es la conductancia por convección térmica, A_s es la superficie de ensamble, T_g es la temperatura del gas cerca de la superficie y T_s es la temperatura de la superficie de ensamble.

2.1.3.2.4 Reflujo por láser

Los sistemas de reflujo por láser más comúnmente usados incluyen el láser de CO_2 , el cual emite a una longitud de onda de $10.6 \mu\text{m}$ y el láser Nd:YAG, el cual emite a una longitud de onda de $1.06 \mu\text{m}$. El reflujo por láser es un proceso ideal para dispositivos que son sensibles al calor, debido a que el calor es aplicado solamente en el área de la unión. También es ideal para empaquetados densos de dispositivos en una placa, ya que puede alcanzar componentes con espacios reducidos, sin dañar partes adyacentes [2,25].

2.1.4 Ventajas de la tecnología de reflujo en SMT

La pasta de soldadura o reflujo, la cual en la actualidad es muy usada, ofrece mayores ventajas sobre la tecnología de soldadura de ola. En la figura 2.7 se muestran los pasos en el proceso de ensamble por reflujo y por soldadura de ola.

a) La pasta de soldadura no sólo sirve como material soldador, sino también como pegamento. Ésto a diferencia con la soldadura de ola en la cual es necesaria eliminar el pegamento depositado, además del proceso de curación que se requiere tener.

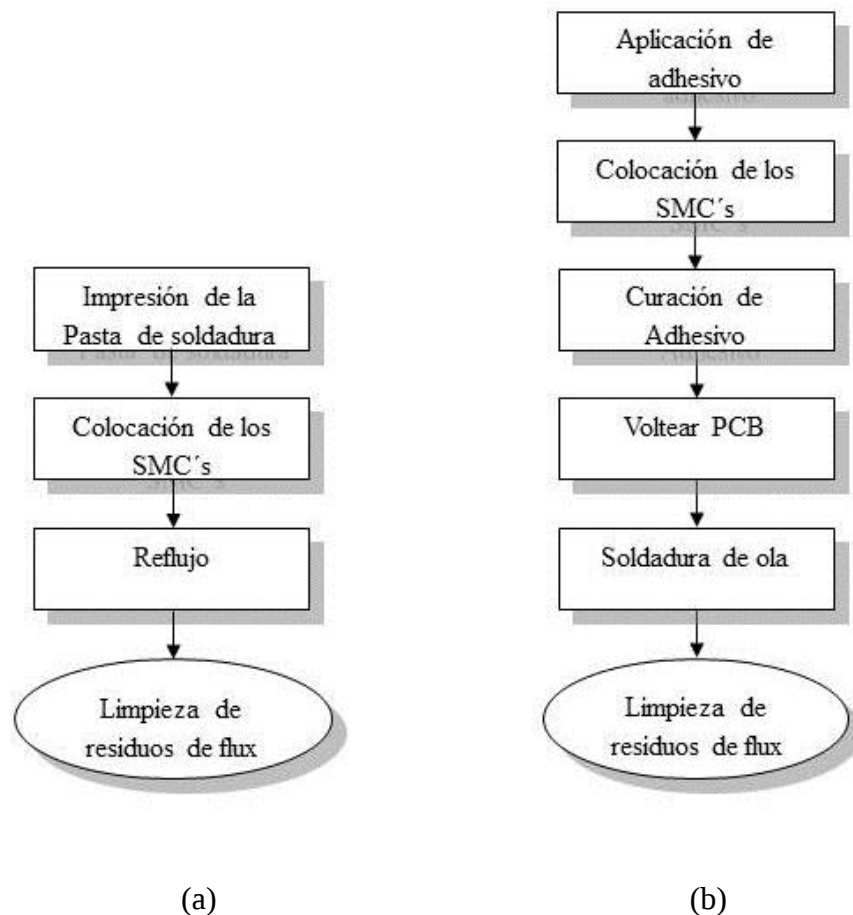


Figura 2.7. Procesos de ensamblaje: (a) Reflujo; (b) Soldadura de ola [2].

b) La deposición de la pasta de soldadura es hecha por un estencil o dispensador, el cuál elimina problemas como insuficiente soldadura en el PCB, debida al efecto de sombreado que puede ocurrir en el proceso de soldadura de ola, además de que se reduce la incidencia de puentes en el SMC's.

c) En el proceso de reflujo se cuenta con un buen control en los perfiles de temperatura usados, eliminando el daño de los SMC's debido al choque térmico que ocurre en el proceso de soldadura de ola.

d) El uso de pasta de soldadura permite la posibilidad de tener etapas al soldar, es decir, en una primera etapa de reflujo, la pasta de soldadura tiene un bajo punto de soldabilidad, teniendo la posibilidad de aplicar nuevamente el reflujo sin alterar las uniones del primer reflujo.

e) El desarrollo de la pasta de soldadura no es sensible al tipo de mascara de soldadura usada en los PCB's.

2.2 Tendencias de la Tecnología de Montaje Superficial.

2.2.1 Dirección de la tecnología

La industria electrónica está principalmente dirigida a desarrollar componentes más pequeños, rápidos, con mayor complejidad, menor consumo de potencia y baratos. Así es como la Tecnología de Montaje Superficial cuenta con varias de estas características como se mencionan a continuación.

Velocidad.

La velocidad en procesamiento de las señales en los aparatos electrónicos, específicamente las computadoras, se incrementa aproximadamente 5 veces cada 5 años. Este incremento en la velocidad es resultado de la reducción del tiempo de retardo en los semiconductores y del tiempo de retardo de empaquetado. Este incremento en la velocidad es asociada a la miniaturización de componentes CI.

Complejidad.

Integración de transistores en un CI. La complejidad en los chips semiconductores puede ser medida por la integración de los transistores, siendo el incremento en la complejidad de éstos dirigida esencialmente por la evolución del empaquetado que le corresponde y la tecnología utilizada para el ensamble.

Número de terminaciones. Un resultado del incremento en la complejidad de los CI es el incremento en el número de terminaciones en el empaquetado.

Miniaturización. Debido a la necesidad de contar con componentes más pequeños y ligeros, la miniaturización es la tendencia general en la industria electrónica, particularmente para los consumidores de productos electrónicos.

2.2.2 Paquetes con Arreglo de Área

Los paquetes con arreglo de área son componentes con interconexiones de entrada salida I/O distribuida en la parte inferior de los componentes en un patrón llamada arreglos de área.

Las interconexiones están compuestas de metal o bombas de polímeros, y los paquetes de arreglo de área son montados en los substratos por medio de soldadura o adhesivos. Las familias de paquetes de arreglo de área incluyen el CSP, FC y BGA.

2.2.2.1 CSP

El paquete a escala de chip (CSP por sus siglas en inglés, Chip Scale Package) es un CI de arreglo de área con tamaño no mayor a 1.2 X de CI de dimensión lineal y no mayor de 1.5X de CI en área. Sus dimensiones son pequeñas y es utilizado en el mercado de las telecomunicaciones. El CSP sigue el proceso de SMT típico: impresión de pasta de soldadura, colocación de los componentes, reflujo, e inspección.

2.2.2.2 FC

El Flip Chip (FC) es una tecnología de conexión de chip la cual interconecta un chip de CI al siguiente nivel de empaquetamiento, el cuál a manera de CI activa los lados del substrato. En la figura 2.8 se muestra un Flip Chip ensamblado sobre un BGA.

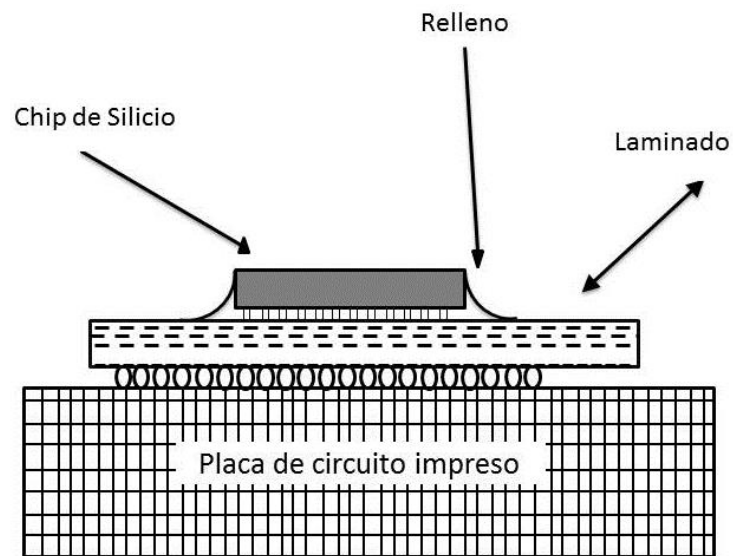


Figura 2.8. Flip Chip ensamblado sobre un BGA [2].

2.2.2.3 BGA

El BGA (por sus siglas en inglés Ball Grid Array) es un arreglo de matrices de bolas de soldadura que se encuentra ubicado por debajo del empaquetado. En la figura 2.9

se muestra el esquemático de una base laminada del empaquetado de un BGA. Una de las mayores ventajas que ofrece el BGA es su robustez en la manejabilidad. El ensamble y re-trabajo del BGA dan un alto rendimiento si se procesa correctamente. La desventaja del BGA es la dificultad de inspeccionar el interior de las uniones de soldadura. El CSP se comporta de forma similar al BGA, excepto en que es más sensible si se le da un mal manejo.

2.2.2.3.1 Proceso de ensamble del BGA

El BGA al igual que el CSP sigue el proceso de SMT típico: impresión de pasta de soldadura, colocación de los componentes, reflujo, e inspección. En la figura 2.10 se muestra el proceso de ensamble de un BGA.

Impresión de la pasta de soldadura.

Para que se tenga la impresión de pasta de soldadura, primero es necesario contar con una plantilla que sirva como guía para el diseño de las bolas de soldadura. Dado que la confiabilidad en la soldadura es una función fuerte del volumen de soldadura utilizada, así como del tipo de paquete, la figura de diseño en la plantilla debe ser adaptada a cada tipo de empaquetado. Dependiendo de los costos y la forma que se necesiten, los materiales utilizados en la plantilla son latón, acero inoxidable, molibdeno, níquel y plásticos.

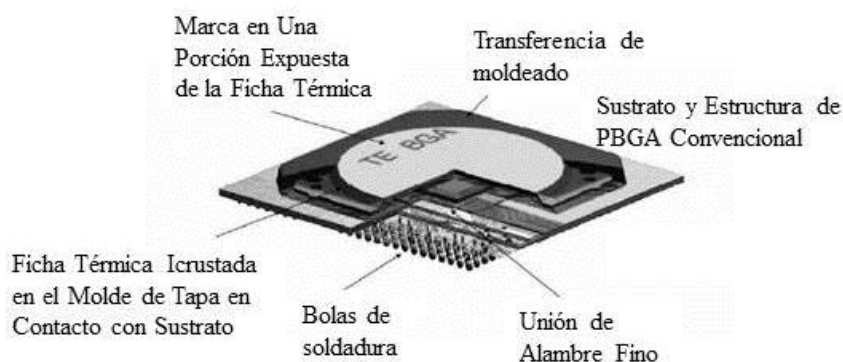


Figura 2.9. Esquemático de una base laminada de un paquete de BGA [2].

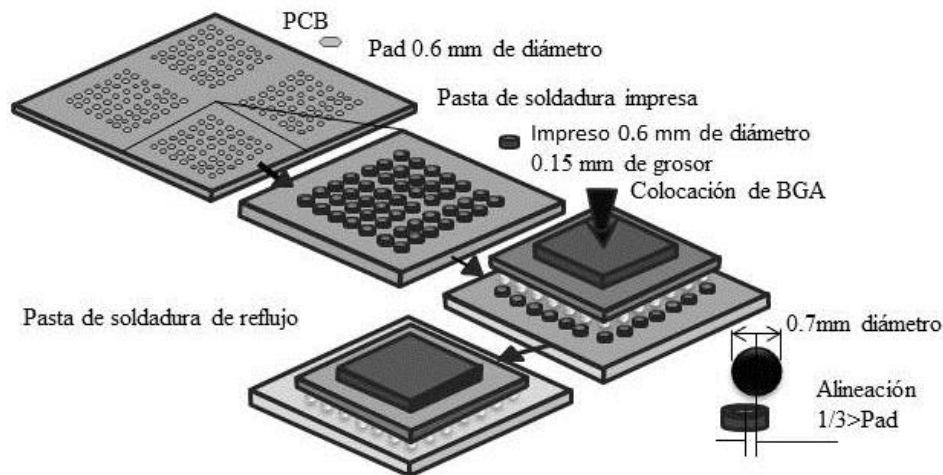


Figura 2.10. Flujo del proceso de ensamblaje del BGA [2].

La bola de soldadura se construye mediante el depósito gradual de soldadura ya sea mediante un proceso seco, como la evaporación, o un proceso húmedo, como la galvanoplastia.

Colocación de los componentes.

El BGA tiene la capacidad de auto centrarse debido a la tensión superficial de la soldadura. Para componentes BGA de 50 mil pitch*, por ejemplo, el 50% de desalineación es aceptable, en cambio para un BGA de 40 mil pitch es el 40%. En la figura 2.11 se puede observar esta auto-alineación del BGA en la plataforma de la placa.

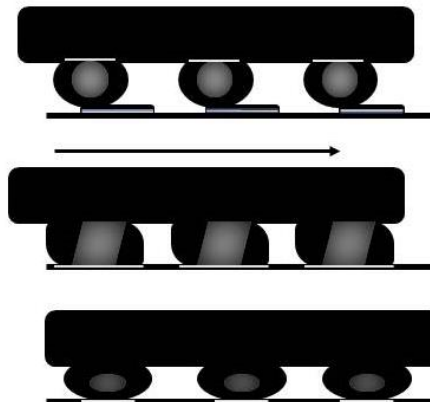


Figura 2.11. BGA auto-alineándose a la plataforma del PCB debido a la tensión superficial de la soldadura [2].

*mil pitch: unidad de milésimas de resolución de separación entre terminaciones

Reflujo.

Como cualquier otro componente de montaje superficial el reflujo del BGA puede llevarse a cabo por convección de aire forzado, hornos de infrarrojo y fase de vapor. En el perfil de temperatura convencional se tiene una etapa de precalentamiento, pre-flujo, reflujo y enfriamiento. Las temperaturas alcanzadas en estas etapas de reflujo son muy dependientes del tipo de aleación utilizada en la pasta de soldadura. En la figura 2.12 se muestra el perfil de temperatura de reflujo típico utilizado para soldar componentes SMT.

Inspección.

Una de las mayores diferencias que encontramos en el BGA con cualquier otro componente SMC es el proceso de inspección, dado que no se puede dar una inspección visual sencilla para conocer si el ensamble fue correcto o no. Por lo que es necesario contar con equipo de rayos-X para hacer una verificación completa de que el BGA se encuentra bien alineado y que se tuvo una buena fusión de la soldadura. La transmisión de rayos-x puede detectar vacíos, puentes, desalineación y aperturas.

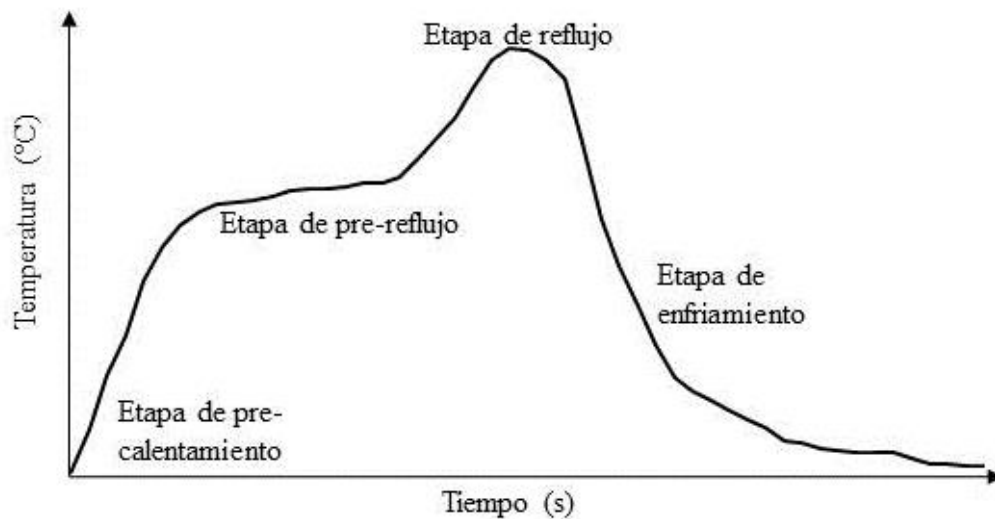


Figura 2.12. Perfil de temperatura de reflujo.

Re-trabajo.

Debido a la sensibilidad de los componentes, el re-trabajo en el BGA requiere de precaución extra. En la figura 2.12 se muestra el perfil de temperatura usado tanto en la etapa de ensamble como en la de re-trabajo, y en la figura 2.13 se muestra el flujo del proceso de re-trabajo. La primera etapa se prepara la placa para el re-trabajo, es colocada una pequeña cantidad de flux líquido en los bordes del componente. En la siguiente etapa la placa es precalentada y calentada por ambos lados, superior e inferior, retirando el componente. En la tercera etapa se prepara el sitio para la inserción, en donde es removido el exceso de soldadura, se limpia e inspecciona el lugar y se aplica flux o pasta de soldadura. En la cuarta etapa es colocado el componente, en la quinta etapa se le aplica el reflujo al BGA y por último se inspecciona y limpia si es necesario.

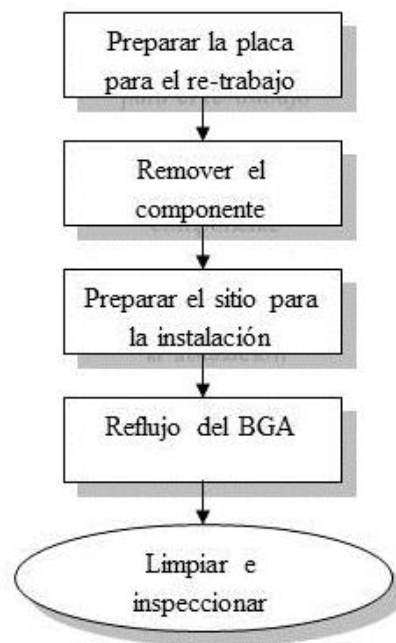


Figura 2.13. Flujo del proceso de re-trabajo en un BGA [2].

2.2.2.4 Problemas en las etapas de ensamble y re-trabajo

En el proceso de ensamble y re-trabajo, podemos encontrar varios problemas, en los que se encuentran: insuficiente soldadura, mala auto-alineación, mala unión en la

soldadura, huecos, puentes, aperturas, uniones con alturas desiguales, puentes temporales, bolas de la soldadura, popcorn o palomita de maíz y delaminación.

Insuficiente soldadura.

Esto sucede cuando el volumen de soldadura no es suficiente para realizar una buena unión de soldadura. La causa más común es insuficiente pasta de soldadura en la impresión, así como una mala soldadura. En la figura 2.14 se muestran las imágenes de rayos X de las uniones de soldadura normal de un BGA y una con insuficiente soldadura en las uniones.

Mala auto alineación.

Se encuentra una mala auto alineación cuando el porcentaje de desalineación del componente sobrepasa la tolerancia del 50%. En la figura 2.15 y 2.16 se muestran un mala auto alineación de la unión de soldadura de un BGA. La mala auto alineación puede deberse a una excesiva desalineación, insuficiente volumen de soldadura, pobre esparcimiento de flux o una mala fusión en el pad, una reducida tensión superficial, cambios en la composición de la soldadura, alta inercia en el componente, desalineación de la máscara de soldadura, grandes esquinas en los pads y sobreimpresión.

Por lo que para contrarrestar estos problemas, se deben de seguir las siguientes recomendaciones:

- Correcta colocación del componente.
- Incrementar el volumen de la pasta depositada.
- Mejorar el pad o la fusión de las bolas.
- Usar fluxes con alta actividad.
- Usar una atmósfera de reflujo inerte.
- Mejorar impresión de la máscara de soldadura para que sea exacta.
- Usar pads con esquinas largas para el diseño de impresión de la placa.
- Sobre imprimir los pad de esquinas largas con pasta de soldadura.

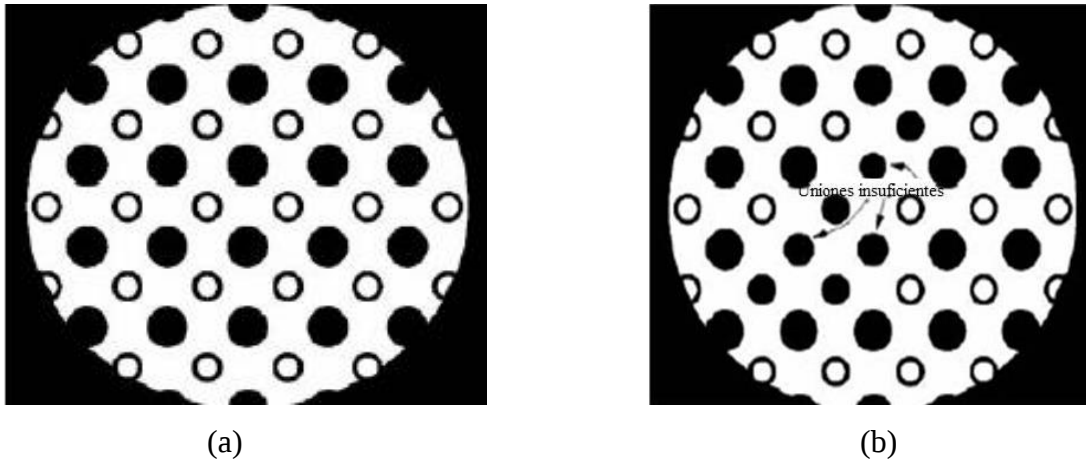


Figura 2.14. Rayos X de las uniones de soldadura de un BGA,
(a) Uniones de soldadura de un BGA normal, (b) Insuficiente soldadura en las uniones
causadas por una mala soldadura en la vía [2].

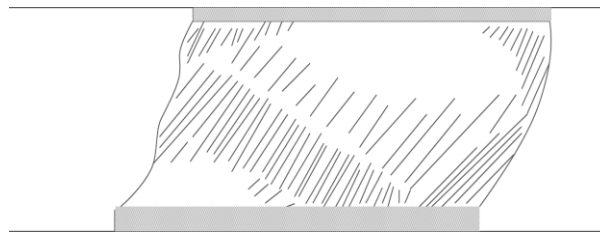


Figura 2.15. Mala auto-alineación de la unión de soldadura de un BGA [2].

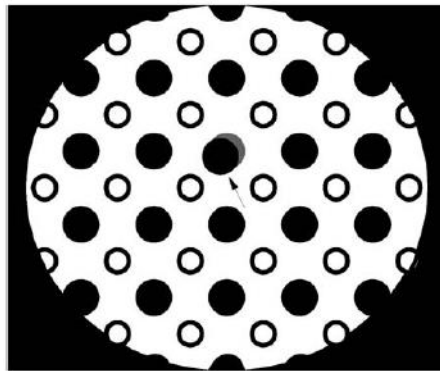


Figura 2.16. Fotografía de rayos X de una bola que no se auto alinea con el 50%
con el pad del board [2].

Mala unión de la soldadura.

Puede deberse principalmente a una alta oxidación de las bolas superficiaes que aparece como una bola opaca. En la figura 2.17 se muestran las fotografías de una bola de soldadura brillante en la que se puede tener una buena unión de la soldadura y una bola opaca, con alta oxidación provocando una mala unión de la soldadura.

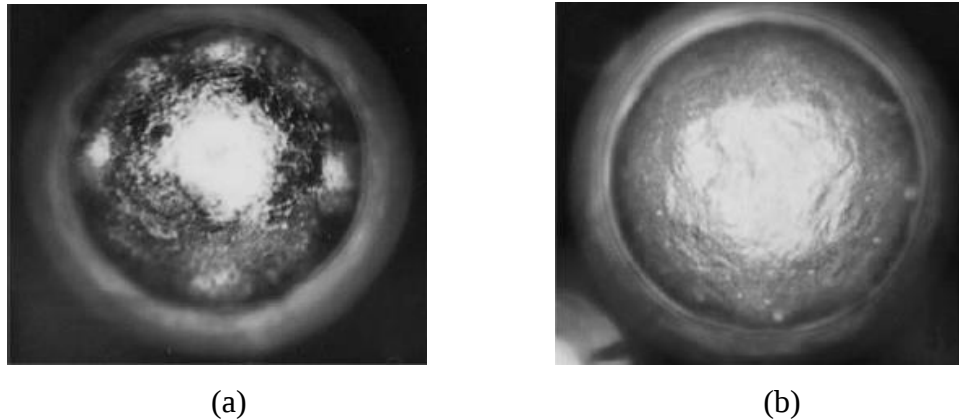


Figura 2.17. Bolas de soldadura 62Sn/36Pb/2Ag: (a) bola brillante, (b) bola opaca [2].

Vacíos.

Los vacíos en el BGA es un tema muy controversial. Los vacíos son considerados concentración de estrés, por lo que pueden afectar las propiedades mecánicas de las uniones, reducir la fuerza y el tiempo de vida. Cada compañía maneja un porcentaje de vacíos aceptables por lo que se puede manejar que:

- Un bajo contenido de vacíos son aceptables.
- Demasiados vacíos no son aceptados.
- Un área máxima de vacíos son aceptable entre el 15 al 25 %.

Los vacíos son introducidos en el BGA principalmente en la etapa de ensamble, por algunos efectos en los que se encuentran: efectos de la volatilidad del solvente, exclusión del flux, efecto del perfil de reflujo, efectos por el contenido de metal, efectos por el tamaño del polvo de soldadura, efectos de la atmósfera de reflujo, efecto del terminado de la superficie, el efecto del tiempo de exposición de la pasta, efecto causado por el diseño de los pads en la placa, efecto por la calidad de las partes y efecto del proceso de orientación. En la figura 2.18 podemos observar el vacío en una bola de soldadura de BGA.

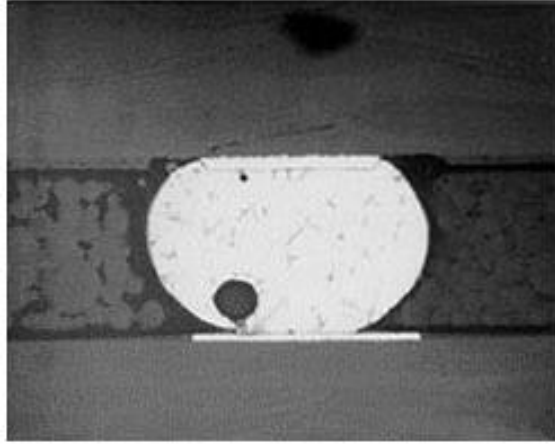


Figura 2.18. Sección transversal de una unión de soldadura BGA que muestra la presencia de un vacío [2].

Puentes.

Los puentes es uno de los principales problemas que se tiene en el ensamble del BGA. Una mala fusión de las bolas de soldadura pueden causar los puentes, pudiendo ser por excesiva pasta de soldadura, por el efecto popcorn, por delaminación o por mala alineación de los componentes. En la figura 2.19 se muestra la fotografía de las uniones de un BGA con puentes.

Los puentes pueden ser eliminados siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Mejorar la fusión de la soldadura de los paquetes.
- Controlar el volumen de pasta de soldadura depositada.
- Evitar el mal manejo manual de los dispositivos después de la colocación.
- Pre-hornear el BGA cuando sea necesario para evitar el efecto popcorn.
- Mejorar los materiales externos debajo del dispositivo.
- Mejorar la alineación del dispositivo colocado.

Aperturas.

Pueden ser causadas por diversos factores, que incluyen insuficiente volumen de soldadura, pobre fusión de la soldadura, no coplanabilidad, mala colocación de los dispositivos, mala expansión térmica y salida de gases a través de la máscara de la

soldadura. En la figura 2.20 se muestra la unión de soldadura de un BGA mostrando una apertura.

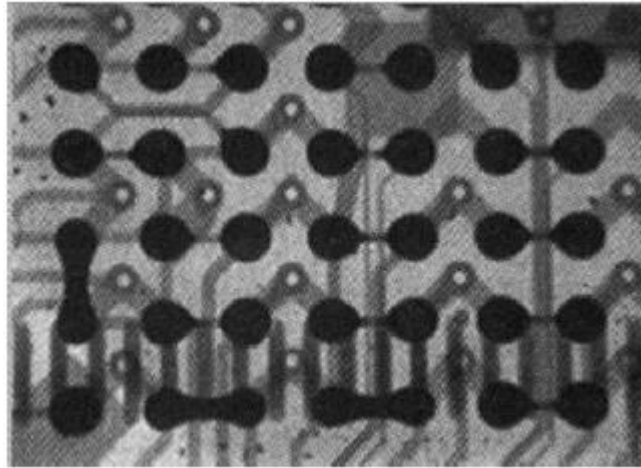


Figura 2.19. Fotografía de rayos X de las uniones de un BGA con puentes [2].

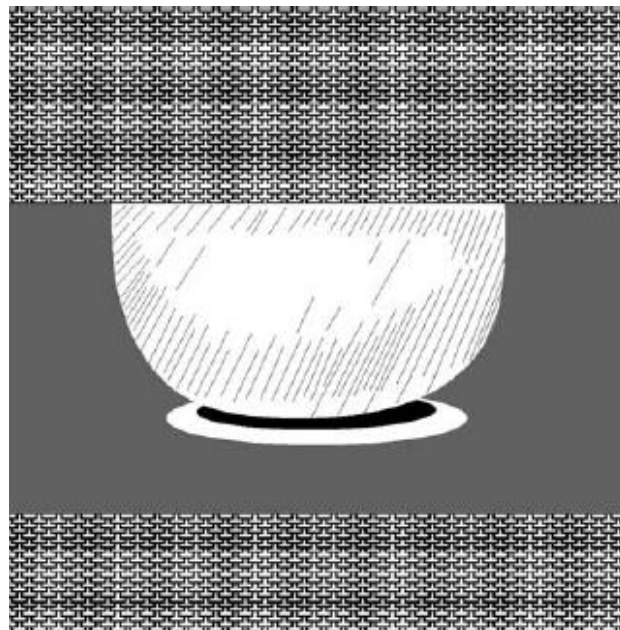


Figura 2.20. Unión de soldadura de un BGA mostrando una apertura [2].

Las aperturas pueden ser reducidas implementando las siguientes recomendaciones:

- Depositar suficiente pasta de soldadura.
- Mejorar la capacidad de soldar el pad del tablero.
- Mantener coplanabilidad de la unión.

- Colocar los componentes con precisión.
- Evitar el desarrollo de gradientes de temperatura.
- Pre-hornear los componentes.

Uniones con alturas diferentes.

La unión de la soldadura del BGA es típicamente en forma convexa, con la altura de la unión determinada por la tensión superficial de la soldadura, las dimensiones del pad, el diseño de la máscara de la soldadura de todo el pad y el peso de los componentes. Cuando se utilizan ambos lados del PCB, la altura de la unión de los componentes inferior puede ser alargada en función del peso del empaquetado, siendo en la mayoría de los casos de forma convexa. Por otro lado, si el componente es pesado, la unión puede ser estirada para obtener una forma delgada cóncava.

Sin embargo hay ocasiones en que las uniones difieren en alturas ocasionando una deformación del empaquetado del BGA. Cuando el empaquetado se empieza a enfriar, éste se empieza a deformar. La deformación se continúa incrementado conforme la temperatura decrementa, causando que las uniones exteriores sean mayores que las uniones interiores. La forma de solucionarlo es contar con un buen perfil de temperatura, además de mejorar el empaquetado del BGA con más capas de cobre en el sustrato. En la figura 2.21 se muestra el esquemático de un BGA con alturas diferentes en las uniones.

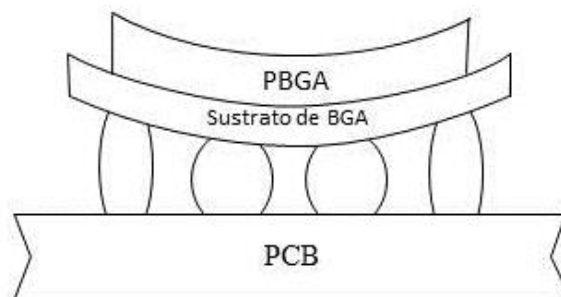


Figura 2.21. Esquemático de BGA con alturas diferentes de las uniones [2].

Puenteo temporal.

Los puentes temporales son una unión continua de soldadura en paralelo, pero no necesariamente adherida a la superficie. El puente temporal es seguido por rompimiento de la soldadura. Es causado por manchas de la pasta de soldadura, una mala colocación o una acción de ajuste. Si el flux no es suficiente como para remover el óxido de la superficie, también puede ser causa de este defecto.

Para evitar estos puentes debe de usarse una temperatura más baja o curado además de seleccionar el relleno con adecuada adhesión. En la figura 2.22 se muestra la fotografía de rayos X de uniones de soldadura 63Sn/37Pb mostrando puentes temporales.

Bolas de soldadura.

La mala soldadura de las bolas es el problema más encontrado en el proceso de reflujo de la pasta de soldadura de SMT. Las causas son: uniones frías, no fusión de la soldadura, disolución del metal con la soldadura, composición intermetálica, efectos lápida, sesgar, capilaridad, así como los ya mencionados, vacíos y puentes.

Las uniones frías, pueden darse por insuficiente calor en la etapa de reflujo, uniones removidas en la etapa de enfriamiento, alteración del flux debido a contaminación de la superficie, insuficiente capacidad del flux para remover el óxido y mala calidad del polvo de soldadura. En la figura 2.23 se muestra el ejemplo de uniones frías.

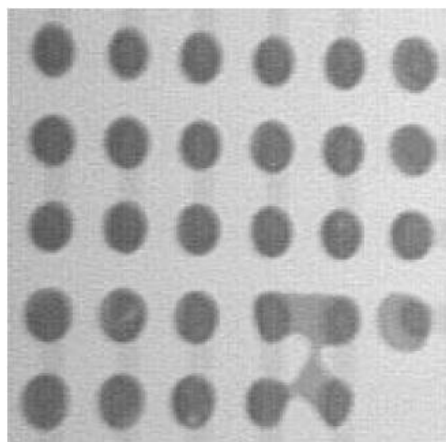


Figura 2.22. Fotografía de rayos X de uniones de soldadura 63Sn/37Pb mostrando puentes temporales [2].



Figura 2.23. Ejemplo de uniones frías [2].

Mala fundición de la soldadura.

Las causas para que no haya buena fusión de la soldadura se encuentra: mala fundición de los metales, una mala calidad de aleación, una mala calidad del polvo de soldadura, una pobre actividad del flux y un inadecuado perfil de temperatura. En la figura 2.24 se muestra el ejemplo de una no fundición de la soldadura, mostrada por la exposición de los pads de cobre.

Sobre fundición (*Dewetting*).

El dewetting o sobre fundición de la pasta de soldadura es un problema en una gran variedad de sustratos y compromete la calidad de las uniones de la soldadura, reduciendo el tamaño de la soldadura. La apariencia de ésta es de agua o grasa. En la figura 2.25 se muestra un ejemplo de sobre fundición donde la pasta de soldadura se contrae después del reflujo y se esparce sólo una parte del área que tiene que ser cubierta por la pasta.



Figura 2.24. Ejemplo de una no fundición de la soldadura, mostrada por la exposición de los pads de cobre [2].



Figura 2.25. Ejemplo de sobre fundición donde la pasta de soldadura se contrae después del reflujo y se esparce sólo una parte del área que debe cubrirse por la pasta [2].

Disolución del metal con la soldadura.

La disolución del metal con la soldadura es un fenómeno donde el metal base se disuelve con la soldadura líquida en el reflujo. Como resultado, la unión de la soldadura puede estar saturada con este metal ajeno, el cual puede contener cantidades significantes

de partículas de derivados intermetálicos de estos metales. En la figura 2.26 se muestra una gráfica de disolución de metales y metalizaciones en 60Sn/40Pb.

Composición intermetálica.

Cuando 2 elementos metálicos tienen una limitada solubilidad, uno hacia el otro, la aleación puede formar nuevas fases cuando la solución de la aleación se solidifica. Estas nuevas fases no son soluciones sólidas, y son conocidas como fases intermedias o composiciones intermetálicas (IMC's) o simplemente intermetálicos. En la figura 2.27 se muestran las fotografías de composiciones intermetálicas formadas entre Cu y soldadura Sn/Pb desarrollado en un proceso de soldadura de ola y en el proceso de soldadura por reflujo.

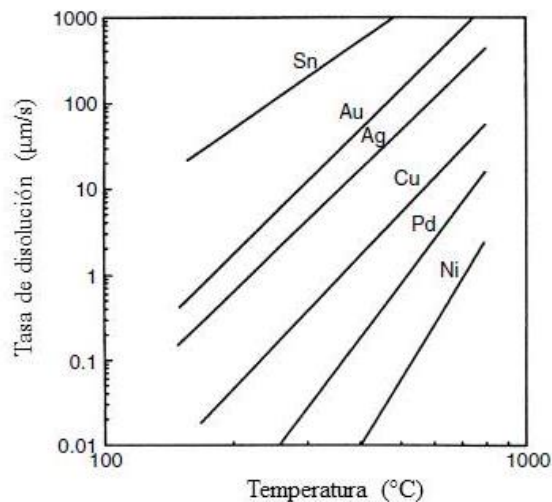


Figura 2.26. Disolución de metales y metalizaciones en 60Sn/40Pb [2].

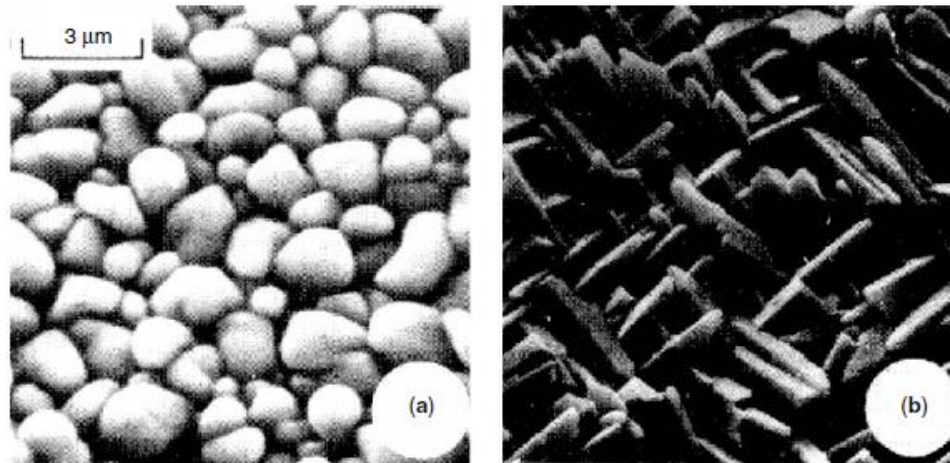


Figura 2.27. Composición intermetálica entre Cu y soldadura Sn/Pb: (a) IMC desarrollado en un proceso de soldadura de ola, (b) IMC desarrollado en el proceso de soldadura por reflujo [2].

Efecto lápida.

Es la separación en una terminal del componente, estando unido sólo un lado. La forma de eliminar este problema es eliminar el nivel de oxidación o contaminación en las terminales del componente, un perfil de temperatura adecuado y contar con un método para soldar con uniformidad en la distribución térmica.

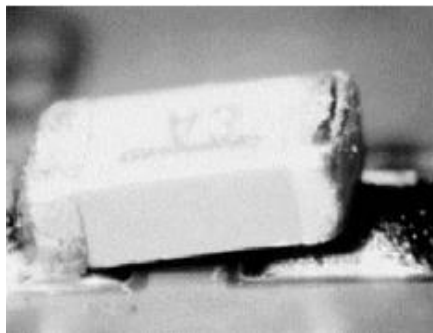


Figura 2.28. Ejemplo del efecto lápida en un capacitor en chip siendo el mismo caso para un BGA [2].

Sesgar.

Es el movimiento del componente en el plano horizontal, resultando en una mala alineación del componente en la etapa de reflujo. La forma de eliminar este problema es: reducir la tasa de calentamiento, balancear el diseño del block para las terminales, reducir el nivel de contaminación de metalizaciones de los componentes y de la placa.

Capilaridad.

En este fenómeno, la soldadura fundida moja la terminal del componente y sube por ésta, lejos del área de unión, teniendo como resultado una unión abierta. Los procesos para evitar este problema son usar una baja tasa de calentamiento y usar más calentamiento en la parte inferior que en la parte superior del componente. En la figura 2.31 se muestra un ejemplo de capilaridad de soldadura en terminales J. La tercera terminal de la izquierda no tiene unión de la soldadura, teniendo la soldadura en la parte superior de la terminal [1].

Efecto popcorn o palomita de maíz y delaminación.

El efecto popcorn y la delaminación son provocados por la absorción de humedad del plástico del BGA. La solución es el utilizar el BGA en el tiempo indicado al ser puesto a temperatura ambiente, además de tener un adecuado perfil de temperatura. En el efecto popcorn o palomita de maíz, el empaquetado se revienta como dice su nombre como palomita de maíz, mientras que en la delaminación se tiene un rompimiento de las uniones del dado y el sustrato. En la figura 2.30 se muestra la sección transversal de un empaquetado BGA de 2 capas, después de 260° C, indicando delaminación con la fijación del dado y las capas internas del sustrato.

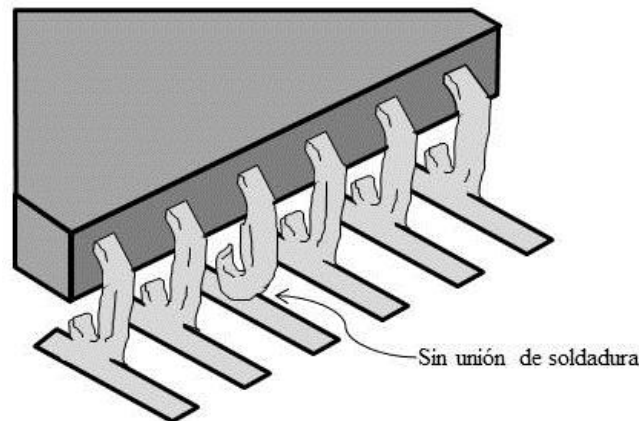


Figura 2.29. Ejemplo de capilaridad de soldadura en terminales J [2].

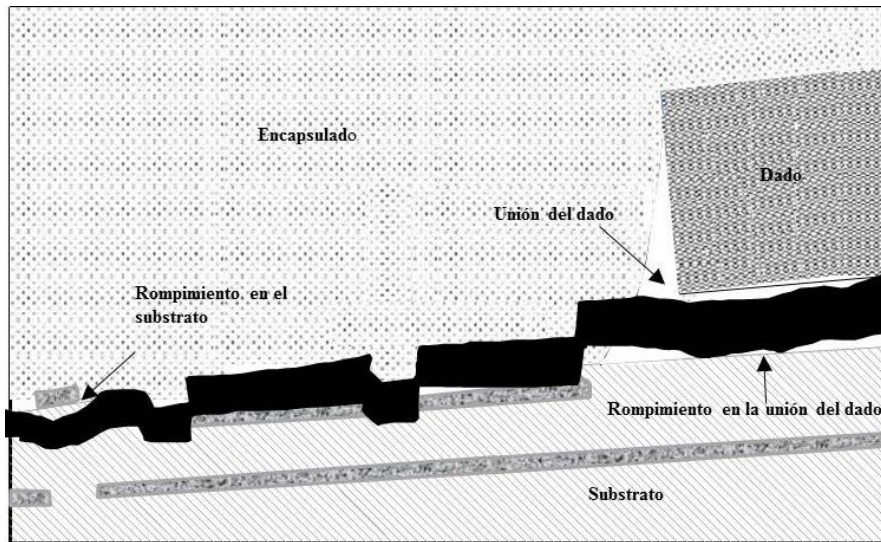


Figura 2.30. Sección transversal de un empaquetado BGA de 2 capas, después de 260° C, indicando delaminación con la fijación del dado y las capas internas del substrato [2].

2.2.3 Pasta de soldadura

Durante años la pasta de soldadura utilizada para soldar componentes electrónicos, fue la soldadura de estaño (Sn) con plomo (Pb). Las cantidades entre estos componentes podían variar, así como la temperatura a la cual se vuelven líquidas estas aleaciones. Por ejemplo la soldadura 63Sn/37Pb eutéctica cambia instantáneamente de su estado sólido a líquido a una temperatura de 183°C, siendo ésta la más utilizada.

Sin embargo, debido a la contaminación que produce el plomo al medio ambiente, así como el daño que causa al ser humano, a principios de 1990's la Unión Europea, Japón y Estados Unidos comenzó a trabajar en proyectos de investigación para buscar una soldadura alternativa, de la que contenía plomo [3-9].

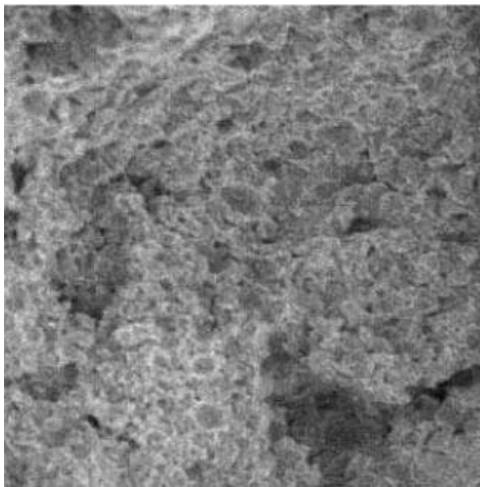
En la búsqueda de una soldadura alterna, se llegó al acuerdo que debe de contar con las siguientes características:

1. Punto de fusión que debe ser lo más cercana posible a la soldadura eutéctica Sn-Pb.
2. La aleación deberá ser eutéctica o muy cercana a la eutéctica.
3. Esta no deberá de contar con más de tres elementos (composición ternaria).
4. Evitar el uso de patentes existentes, si es posible.
5. La confiabilidad debe ser igual o mejor que el eutéctico Sn-Pb.

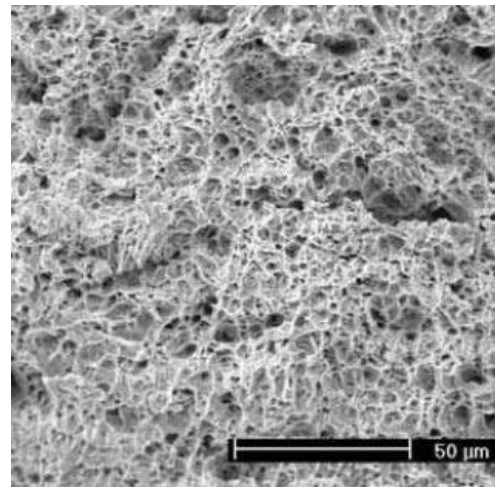
En la siguiente lista se muestran las aleaciones de soldadura libre de plomo, que se consideran como posibles reemplazos para la eutéctica Sn-Pb

1. Aleación eutéctica Sn-58Bi
2. Sistema Sn-Zn-Bi
3. Sistema Sn-Ag-Bi
4. Sistema Sn-Ag-Cu
5. Aleación eutéctica Sn-3.5Ag
6. Aleación eutéctica Sn-0.7Cu

En la figura 2.31 se pueden observar una muestra de la soldadura eutéctica con plomo y la soldadura libre de plomo fracturadas, las cuales son muy similares en su micro-estructura. En la figura 2.32 se muestra la comparación de asperezas entre la aleación Sn-Ag-Cu solidificada y la soldadura Sn-Pb



Sn-37Pb



Sn-3.8Ag-0.7Cu

Figura 2.31. Muestras de soldadura de superficies fracturadas, ambas a la misma amplificación [2].

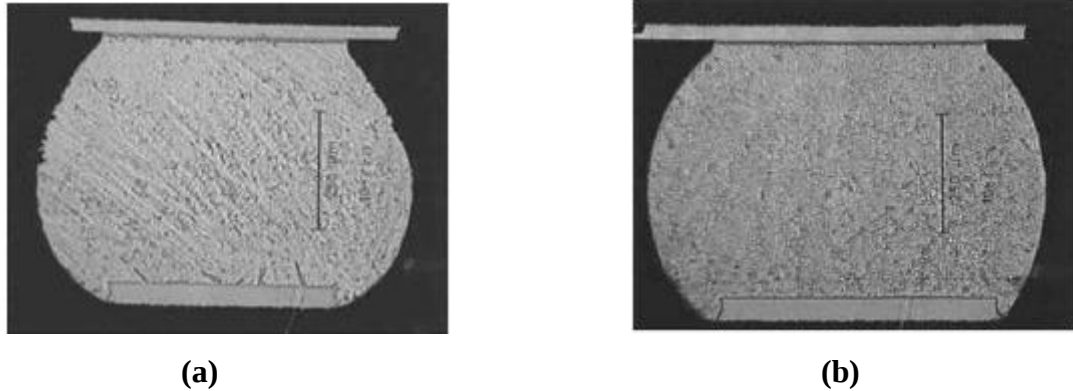


Figura 2.32. (a) Sección transversal mostrando la aspereza de la aleación Sn–Ag–Cu solidificada. (b) Comparación de la aspereza de uniones de soldaduras Sn–Pb y Sn–Ag–Cu [2].

2.2.3.1 Proceso de soldado

La pasta de soldadura es un punto muy importante en el proceso de soldado de cualquier componente electrónico.

Las uniones de soldadura son estructuras complejas, que pueden variar en su microestructura y propiedades mecánicas, dependiendo del metal base que se tiene en la frontera, la velocidad de enfriamiento en la solidificación y el envejecimiento térmico posterior que puede recrystalizar o engrosar la micro- estructura de la soldadura.

Para que sea posible el proceso de soldado en un dispositivo, es necesario contar con tres etapas: el esparcimiento de la soldadura, la disolución del metal con la base y la formación de la capa de compuestos intermetálicos (IMC's).

Cuando la soldadura es esparcida en las fronteras del metal base (comúnmente cobre o níquel), hay una reacción entre la soldadura y el metal base que forma una capa de uno o más IMC's sobre el metal base. En la figura 2.33 se muestra el proceso de soldado.

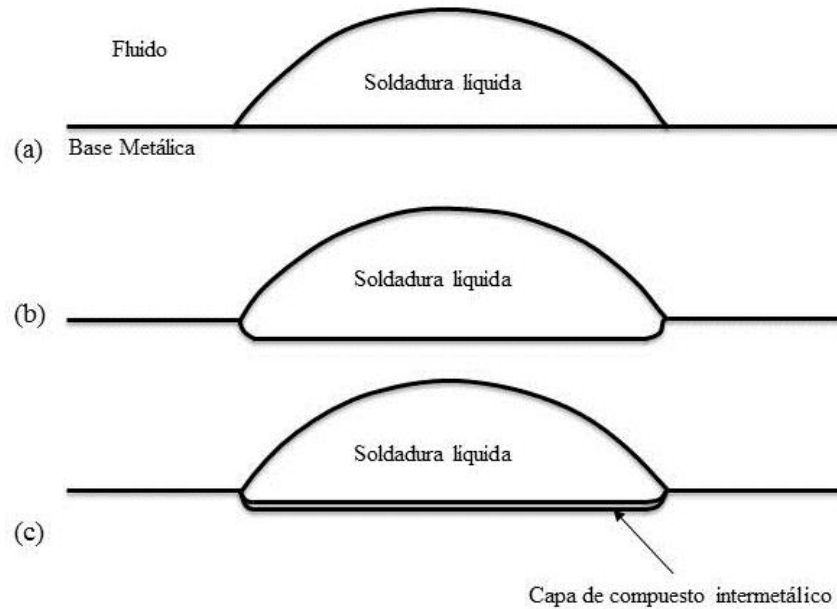


Figura 2.33. Proceso de soldado (a) soldadura líquida esparcida sobre una base metal, (b) metal-base disuelta en soldadura líquida, (c) Reacción del metal-base con soldadura líquida para formar la capa de compuestos intermetálicos [2].

2.2.3.2 Propiedades físicas de la soldadura

Lo atractivo que tiene la soldadura de estaño-plomo, por lo que es usada en el ensamble electrónico, es que cuenta con bajo punto de fusión, lo que permite la unión metalúrgica a una temperatura que es segura para los componentes.

Punto de fusión.

La soldadura de estaño-plomo Sn-Pb tiene un punto de fusión de 183°C , mientras que la soldadura libre de plomo, específicamente estaño-plata-cobre (Sn-Ag-Cu o SAC), que es la más popular debido a su similitud a la soldadura Sn-Pb eutéctica, tiene un punto de fusión alrededor de 217°C .

Fatiga térmica.

Los daños por la fatiga térmica están dados por el coeficiente de expansión térmica (CET), que es la falta de correspondencia entre los diferentes materiales que componen el ensamble de componentes electrónicos, junto con el hecho de que la soldadura se deforma

plásticamente. El daño se acumula dentro de la unión de la soldadura con cada ciclo de temperatura, y, finalmente, es originada una grieta que se propaga y crea una apertura eléctrica. En la tabla 2.1 se muestran los valores de CET a temperatura ambiente para materiales de Montaje Superficial. Como se puede observar en esta tabla, el CET para la aleación sin plomo Sn-Ag-Cu es aproximado al valor de CET que tiene la eutéctica soldadura con plomo Sn-37Pb.

Tabla 2.1. Valores de CET a temperatura ambiente para materiales de Montaje Superficial.

Materiales	CET (ppm/°C)
Libre de Halógeno	16-22
FR-4 PCB (x,y) silicio	5
LTCC	3-8
Sn	22,23.8
Sn-Ag-Cu	23
Pb	29.3
Sn-37Pb	24.7
Cu	17
Aleación 42	5
Componente PBGA	9-11

Soldadura con plomo vs sin plomo.

Como se mencionó anteriormente, se busca que la soldadura sin plomo sustituya a la soldadura con plomo, la cual causa problemas al ser humano y al ambiente. Por lo tanto es importante conocer cómo se comportan ambas soldaduras al momento de aplicar el perfil de reflujo.

El perfil de reflujo para soldadura con plomo y sin plomo contiene cuatro etapas, en las cuales se encuentra una etapa de pre-calentamiento, pre-reflujo, reflujo y enfriamiento. A continuación se explica cada una de las etapas en el perfil de reflujo para soldadura con plomo y sin plomo.

- Pre-calentamiento: El PCB y los componentes son calentados gradualmente. El exceso de solventes es eliminado.
- Pre-reflujo: El flux en los componentes es activado y empieza a reducirse el óxido de la superficie de las partículas de soldadura, de las terminales de los componentes y de los pads del PCB. La activación del flux continúa para mantener la superficie metálica re-oxidada y permite la diferencia de calentamiento en los componentes de la placa para alcanzar la misma temperatura máxima.
- Reflujo: La pasta de soldadura es llevada hasta y más allá del punto de fusión de la aleación. La activación del flux reduce la tensión superficial en la interfaz metálica agregada en el proceso de soldadura.
- Enfriamiento: El ensamble es enfriado tan uniformemente como sea posible, por lo que el exceso de compuestos intermetálicos no son formados y los componentes y la placa no son sujetos a un choque térmico.

Sin embargo, las temperaturas que son requeridas en cada una de las aleaciones para llegar al punto de fusión varían. Un ejemplo es la soldadura eutéctica Sn-Pb la cual tiene una temperatura de fusión de 183°C, mientras que para la aleación libre de plomo Sn-Ag-Cu es de 217°C, una diferencia de 34°C entre ellas. En la figura 2.34 se muestra las diferencias de temperatura usadas en el perfil de reflujo para la pasta de soldadura eutéctica Sn-Pb y para la aleación Sn-Ag-Cu y en la tabla 2.2 se muestra el incremento de temperatura en cada una de las etapas de reflujo para soldadura con y sin plomo.

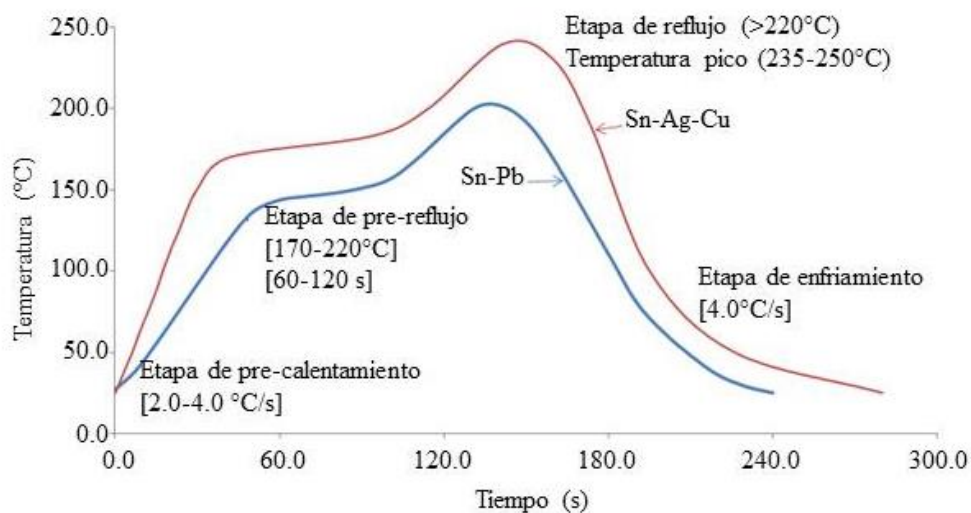


Figura 2.34. Perfil de reflujo para soldadura Sn-Ag-Cu vs soldadura Sn-Pb.

Tabla 2.2. Temperaturas utilizadas en cada una de las etapas del perfil de reflujo para soldadura con plomo y sin plomo.

Etapa de reflujo	Temperaturas para Sn-Pb	Temperaturas para Sn-Ag-Cu
Pre-calentamiento	Ambiente a 120°C	Ambiente a 170°C
Pre-reflujo	120-183°C	170-217°C
Reflujo	183-220°C	217-255°C
Enfriamiento	220-183°C a ambiente	255-217 °C a ambiente

Las temperaturas dadas en la Tabla 2.2 son alcanzadas en las de bolas de soldadura del BGA. En el caso de la soldadura sin plomo, Sn-Ag-Cu, la temperatura en que la soldadura se reblandece va de los 217°C hasta los 255°C, con una ΔT de 10°C de variación

en las temperaturas sin que se tengan daños internos en el CI debido a las altas temperaturas. Con temperaturas mayores a éstas, el BGA puede sufrir problemas, como puentes en su ensamble o re-trabajo, o incluso sufrir daños internos del CI como la delaminación.

Capítulo 3

Fundamentos de óptica

3.1 Introducción

La presente tesis es un estudio teórico-experimental para desarrollar un prototipo soldador de una máquina de re-trabajo de componentes BGA por medio de luz infrarroja (IR) enfocada, el cual para facilitar su nombre, fue abreviado como FILSS por sus siglas en inglés (Focused Infrared Light Soldering System). El propósito de este sistema es el crear una adecuada temperatura con distribución uniforme en el dispositivo BGA que se desea re-trabajar. Por lo que, basándose en la teoría de que a partir de la obtención de distribución de luz uniforme es posible obtener una distribución de temperatura uniforme, en el presente capítulo se presentan los fundamentos de óptica necesarios para el diseño de un sistema óptico que proporcione una distribución de intensidad de luz (irradiancia) y temperaturas uniformes; el cual por lo general, se encuentra constituido por una fuente de luz, una colección de componentes ópticos para el manejo del haz de luz y procesamiento óptico.

A continuación se presentan las bases de óptica geométrica y radiometría, necesarias para comprender el funcionamiento de los elementos ópticos que pueden integrar el prototipo que se propondrá para FILSS.

3.2 Óptica geométrica

El estudio de la óptica geométrica en el desarrollo de la presente tesis fue muy importante, ya que permitió tener una aproximación muy cercana a lo que se obtendría simulada y experimentalmente los arreglos ópticos que se propondrán como prototipos para el sistema de re-trabajo de componentes BGA's, FILSS.

En general, la óptica geométrica estudia el manejo o trazo de rayos de los diferentes frentes de onda o rayos que inciden en cuerpos y que reflejan o refractan la luz. Los elementos ópticos en los que podemos encontrar los fenómenos de reflexión son en los espejos, reflectores y lentes sin película anti reflejante, mientras que la refracción se da en las lentes y en los elementos homogeneizadores.

3.2.1 Reflectores

Un reflector es un elemento óptico, el cual puede estar diseñado de cualquier material que refleje la luz, además de contar con cierta curvatura, la cual puede variar dependiendo de la aplicación. Los reflectores más conocidos, son los reflectores elípticos y parabólicos [30-32].

3.2.1.1 Elíptico

La elipse en el reflector elíptico es una curva plana y cerrada, simétrica respecto a dos ejes perpendiculares entre sí: el semieje mayor el cual se muestra como el segmento C-a de la figura 3.1 y el semieje menor el cual se muestra como el segmento C-b de la figura 3.1. Ambos semiejes miden la mitad del eje mayor y menor respectivamente.

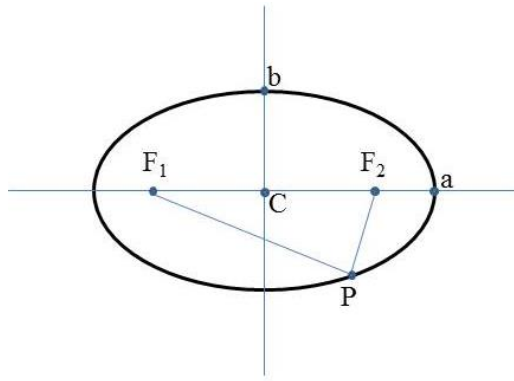


Figura 3.1. Partes de la elipse.

Los focos de la elipse son dos puntos equidistantes del centro, F_1 y F_2 en el eje mayor. La suma de las distancias desde cualquier punto P de la elipse a los dos focos es constante, e igual a la longitud del diámetro mayor, dada por la ecuación (3.1):

$$PF_1 + PF_2 = 2a \quad (3.1)$$

El eje mayor $2a$, es la mayor distancia entre dos puntos adversos de la elipse. El resultado de la suma de las distancias de cualquier punto a los focos equivale al eje mayor. El eje menor $2b$, es la menor distancia entre dos puntos de la elipse. La ecuación de una elipse en coordenadas cartesianas, con centro en el origen, es dada por (3.2):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3.2)$$

donde $a > 0$ y $b > 0$ son los semiejes de la elipse.

3.2.2 Lentes esféricas

Una lente esférica es un elemento óptico, fabricado en un material refractante, en el que las ambas caras que la componen son de forma esférica, ya sea convexa, cóncava o una composición de ambas.

La función principal de las lentes es el concentrar o dispersar rayos de luz, y las más comunes se basan en el distinto grado de refracción que experimentan los rayos de luz al incidir en puntos diferentes de la lente.

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. Éste se define por la ecuación (3.3):

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.3)$$

donde n es el índice de refracción del medio, 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 la ley de refracción:

El rayo refractado se encuentra en el plano de incidencia y el ángulo de refracción θ se encuentra relacionado al ángulo de incidencia θ_1 por la ley de Snell.

La ley de refracción está definida por la ecuación (3.4):

$$n \sen \theta = n_1 \sen \theta_1 \quad (3.4)$$

donde θ es el ángulo de incidencia y θ_1 es el ángulo refractado.

En la figura 3.2 se muestra el trazo de rayos principales en una lente delgada y posteriormente son explicadas cada una de las partes que intervienen en esta.

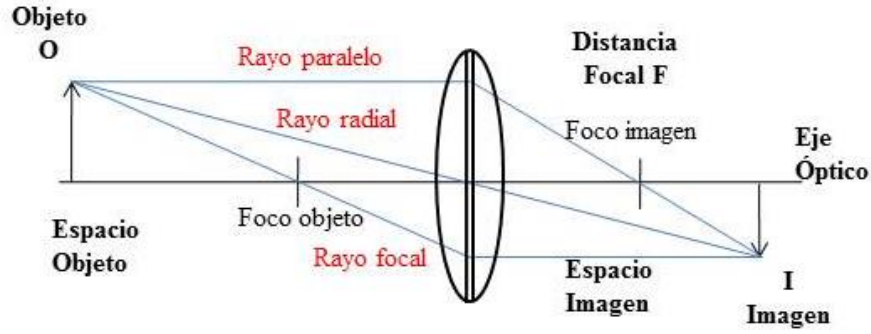


Figura 3.2. Trazo de rayos principales en una lente.

El eje óptico: Es la línea imaginaria que recorre los centros de un sistema óptico.

Distancia focal: Es la distancia definida entre el centro óptico de la lente y el foco (o punto focal) cuando se está enfocando al infinito. La distancia focal de una lente esférica está dada por (3.5):

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.5)$$

donde f es la distancia focal, n es el índice de refracción de la lente, R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las superficies 1 y 2.

Asimismo, esta distancia focal puede definirse por el trazado de rayos como en (3.6):

$$\frac{1}{O} + \frac{1}{I} = \frac{1}{f} \quad (3.6)$$

donde O es la distancia del centro de la lente al objeto, I es la distancia del centro de la lente a la imagen.

Magnificación: La magnificación de una lente se encuentra definida por (3.7):

$$I' = -\frac{I}{O} O' \quad (3.7)$$

donde I y O son las distancias de la imagen y del objeto a la lente, respectivamente; I' y O' son las alturas de la imagen y del objeto, respectivamente.

Objeto óptico: Toda fuente de luz, primaria o secundaria, que envía rayos de luz hacia el sistema óptico.

Imagen: Es formada a partir de los objetos en los sistemas ópticos. Se dice que una imagen es real si está formada por dos rayos refractados convergentes, mientras que una imagen es virtual si la imagen se toma por las prolongaciones de dos rayos refractados divergentes.

Foco objeto: Punto F del eje óptico cuya imagen se encuentra en el infinito del espacio imagen.

Foco imagen: Punto F' del eje óptico que es la imagen de un punto del infinito del espacio objeto.

Espacio objeto: Todo el espacio geométrico donde puede haber objetos.

Espacio imagen: Es el espacio geométrico donde pueden existir imágenes.

Rayo paralelo: Rayo paralelo al eje óptico que parte de la parte superior del objeto. Después de refractarse pasa por el foco imagen.

Rayo focal: Rayo que parte de la parte superior del objeto y pasa por el foco objeto, con lo cual se refracta de manera que sale paralelo. Después de refractarse pasa por el foco imagen.

Rayo radial: Rayo que parte de la parte superior del objeto y está dirigido hacia el centro de curvatura. Este rayo no se refracta y continúa en la misma dirección ya que el ángulo de incidencia es igual a cero. A estos tres rayos se les conoce como rayos principales.

Teniendo ya definidos los parámetros utilizados en el estudio de lentes, a continuación se describen las características de las lentes convexas y cóncavas.

3.2.2.1 Lentes convexas

Las lentes convexas tienen la característica de ser delgadas en los extremos y gruesas en el centro. Los diferentes tipos de lentes que podemos encontrar principalmente son: plano-convexas y biconvexas. En la figura 3.3 se muestra la representación física de ambas lentes.

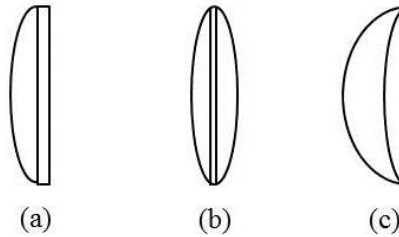


Figura 3.3. Lentes convexas: (a) plano-convexa, (b) biconvexa y

(c) menisco convergente.

Cuando este tipo de lentes son atravesadas por rayos paralelos o colimados, estas los hacen converger en la distancia focal f . A este tipo de lentes también se les conoce como lentes convergentes. Los rayos de luz pueden incidir sobre la lente por cualquiera de las dos caras, ya que la lente es transparente, teniendo así dos focos principales. Uno de ellos es el foco objeto y el otro el foco imagen de acuerdo al paso, por ellos, de rayos incidentes o refractados, respectivamente. En las lentes convergentes se tiene que ambos focos son reales.

Todos los rayos que sean paralelos al eje principal se refractan pasando por el foco imagen. Cualquier rayo de luz que pase por el foco objeto, al atravesar la lente se refracta paralelamente al eje principal y los rayos de luz que pasan por el centro óptico, al atravesar la lente, no se desvían.

Un parámetro importante que se debe de tomar en cuenta cuando se va a seleccionar una lente es la apertura numérica de la misma, la cual describe la capacidad de captación de luz. En un medio de índice de refracción n , la apertura numérica N.A. se obtiene por la ecuación (3.8)

$$N.A. = n \sin \theta \quad (3.8)$$

donde n es el índice de refracción de la lente y θ es el ángulo de incidencia del haz con respecto a la normal.

Otro factor importante en la colección del haz de luz es el $F/\#$. En la figura 3.4 se muestra una lente de abertura D , colectando la luz de una fuente y colimándola. La fuente está a una distancia focal, f , de la lente. Como la mayoría de las fuentes radian en todos los ángulos, el aumento de D o disminución de f permite que la lente capture más radiación.

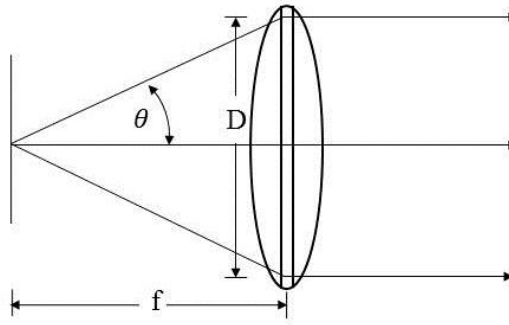


Figura 3.4. Lentes colectando y colimando luz de una fuente.

Su expresión matemática es dada por la ecuación (3.9):

$$F/\# = \frac{1}{2n \sin \theta} \quad (3.9)$$

donde n es el índice de refracción del lugar en donde se encuentra la fuente y θ es la mitad del ángulo del cono de radiación.

Aunque es válido sólo para ángulos pequeños ($\leq 15^\circ$), la aproximación paraxial, es ampliamente utilizada como $F/\#$ mostrada en (3.10) [33]:

$$F/\# \approx f/D \quad (3.10)$$

Cuanto menor sea el $F/\#$ mayor es el flujo de radiación, Φ_c , colectado por la lente.

El flujo Φ_c aumenta a medida que la inversa del cuadrado de $F/\#$, en la ecuación (3.11)

$$\Phi_c \propto \frac{1}{(F/\#)^2} \quad (3.11)$$

$N.A.$ y $F/\#$ están relacionados por la ecuación (3.12):

$$N.A. = \frac{1}{(2F/\#)} \quad (3.12)$$

Puesto que la recolección de la luz varía dependiendo de (3.11), la disminución de $F/\#$ es una forma de maximizar la recolección de la luz. Una lente con bajo $F/\#$ recolecta más flujo, pero las aberraciones de la lente determinan la calidad de la salida colimada. Estas aberraciones aumentan rápidamente con la disminución de $F/\#$. Aunque más luz es colectada por un $F/\#$ muy bajo de la lente, el haz producido es imperfecto. Incluso para una fuente puntual en la que se incluyen los rayos en distintos ángulos, lejos de la colimación ideal. Ningún sistema óptico puede enfocar un haz de baja calidad a una buena imagen de la fuente. Así, mientras que un bajo $F/\#$ de una lente ($\leq F/4$) puede ser un colector eficiente, obtendrá una salida pobre del haz que no se puede enfocar de manera eficiente.

En aplicaciones donde la calidad de imagen o tamaño de la mancha es importante, un condensador con mayor $F/\#$ puede dar mejores resultados. El tamaño de la mancha enfocada puede verse afectado por varios factores. Uno de estos es el $F/\#$, la distancia a la que es colocado el arreglo óptico del área en el que desea la mancha, y otro la separación que existe entre los elementos ópticos.

3.2.2.2 Lentes cóncavas

La característica que tienen las lentes cóncavas es que son gruesas en sus extremos y delgadas por el centro. A este tipo de lentes se les llama divergentes y se denominan así porque hacen divergir o separar el haz de rayos colimados o paralelos al eje principal que pase por ellas, sus prolongaciones convergen en el foco imagen que está a la izquierda, al contrario que las convergentes, cuyo foco imagen se encuentra a la derecha. En la figura 3.5 se muestran los diferentes tipos de lentes divergentes

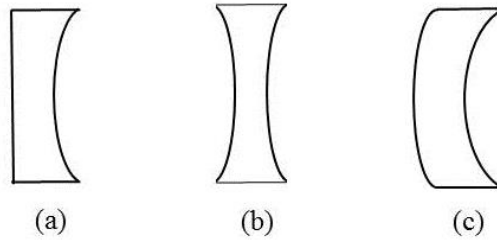


Figura 3.5. Lentes cóncavas. (a) plano-cóncava, (b) bicóncava, (c) menisco divergente.

3.2.3 Lentes esféricas

Una lente esférica tiene una forma diferente comparada con una lente esférica. Esta lente es diseñada para reducir o eliminar aberraciones esféricas. Este tipo de lente es ideal para coleccionar y colimar luz [34].

La aberración esférica causa que los rayos coleccionados tengan un ángulo grande para converger a pesar de que los rayos deban ser paraxiales y colimados, como se muestra en la figura 3.6. Una forma de eliminar este problema es el uso de la lente esférica o un mejor posicionamiento de los elementos utilizados. La mejor posición depende de la lente, la fuente de luz, y su aplicación. En la figura 3.7 se muestra una lente esférica y el trazo de rayos de esta, en la que se observa que colima correctamente los rayos emitidos de una fuente puntual.

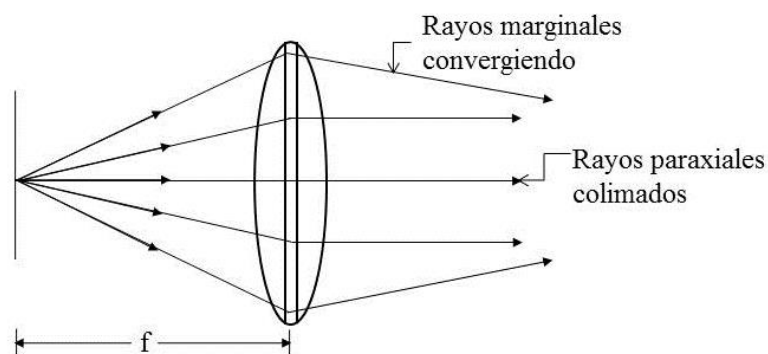


Figura 3.6. Efectos de la aberración esférica en una lente.

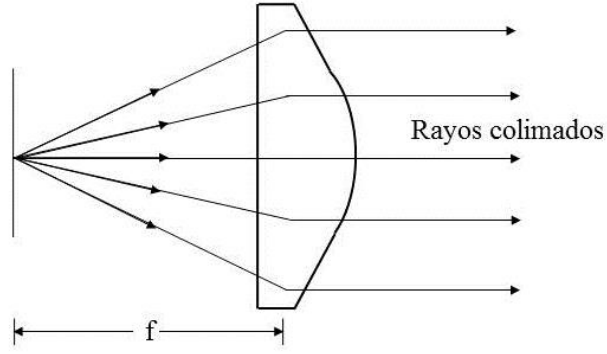


Figura 3.7. Lente esférica colimando rayos de una fuente puntual.

Las lentes esféricas tienen una forma cónica y su superficie esta descrita por una expansión polinomial de la desviación de la superficie esférica. El modelo para el diseño de este tipo de lentes utiliza la base del radio de curvatura y la constante cónica. La superficie está dada por la ecuación (3.13):

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6 + \alpha_4r^8 + \alpha_5r^{10} + \alpha_6r^{12} + \dots \quad (3.13)$$

donde c es el recíproco del radio de curvatura, k es la constante cónica, r es la coordenada del rayo radial en unidades de la lente, e α_i son los coeficientes de α indefinidos.

3.2.4 Homogeneizadores de haz

3.2.4.1 Difusor

En general, un difusor es un dispositivo que extiende o dispersa la luz para hacer más uniforme la iluminación. Esta capacidad de homogenización está relacionada con la distribución aleatoria del centro de dispersión en el difusor, el cual constituye las características responsables de dirigir la luz en las diferentes direcciones dentro de la propagación del difusor. Se encuentran varios métodos para obtener difusores, entre los que

encontramos a los difusores holográficos, difusores de cristal de ópalo y los difusores de vidrio esmerilado.

El difusor de vidrio esmerilado es fabricado por un chorro de arena o grabado en una hoja de vidrio, el cual produce un gran número de muy pequeñas facetas, variando en tamaño y altura aleatorios, que refractan el haz de luz incidente más o menos de forma aleatoria, creando así una distribución uniforme de la luz. La transmisión total del difusor de vidrio esmerilado es del 75 por ciento del haz incidente. Esta transmisión es fuertemente direccionada, por lo que un difusor de vidrio esmerilado está lejos de ser un difusor perfecto. Sus características varían dependiendo de la rugosidad de la superficie. En la figura 3.8 se muestra un haz que incide sobre la superficie de un difusor de vidrio esmerilado y como la aleatoriedad de esta misma crea dispersión del haz, mientras que en la figura 3.9 se muestra la distribución de intensidad obtenida de un difusor de vidrio esmerilado, como es conocido presenta un perfil de distribución gaussiana [35-37].

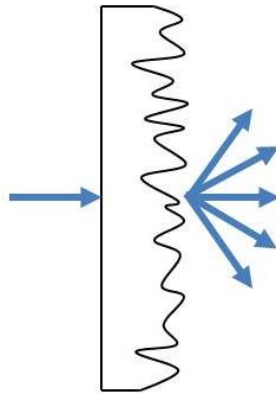


Figura 3.8. Esparcimiento al centro de la superficie de un difusor.

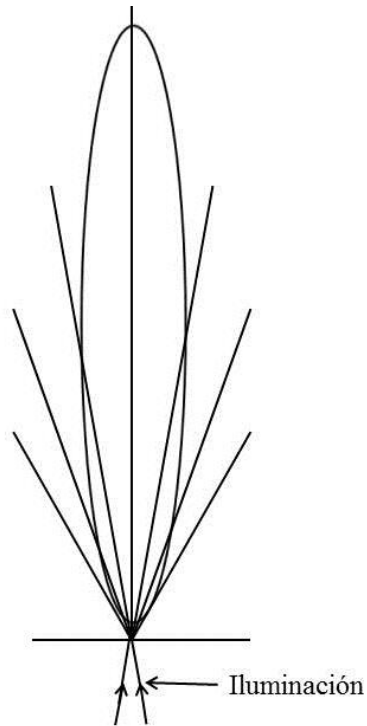


Figura 3.9. Distribución de intensidad de un difusor de vidrio esmerilado [32].

3.2.4.2 Multi-lentes

Una matriz de multi-lentes es un elemento óptico el cual está compuesto por una matriz de $L \times W$ de pequeñas lentes, la cual tiene el mismo funcionamiento que las llamadas micro-lentes, siendo la diferencia entre éstas, el tamaño de las lentes utilizadas en cada uno de los arreglos, siendo para el caso de las multi-lentes el tamaño de milímetros, mientras que para las micro-lentes de micrómetros. En la figura 3.10 podemos observar una matriz de multi-lentes, así como cada uno de los parámetros que la integran.

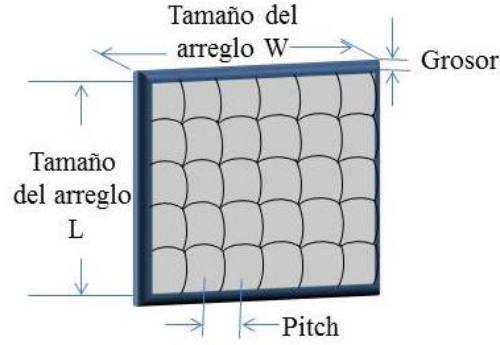


Figura 3.10. Matriz de multi-lentes.

Un sistema no formador de imágenes se encuentra principalmente constituido por una fuente de iluminación colimada, una matriz de multi-lentes y una lente de campo. La matriz de multi-lentes, es utilizada para dividir el haz incidente en pequeños rayos de luz. Estos rayos elementales pasan a través de una lente esférica FL con la finalidad de que estos rayos sean traslapados en el plano de homogeneización FP ubicado en el plano focal posterior de la lente esférica FL. La lente esférica FL hace que los rayos converjan en el plano de homogeneización FP. El patrón de intensidad en el plano de homogeneización está relacionado con los espectros de frecuencia espacial generada por la matriz de micro-lentes que entra en la lente de campo.

La decisión de usar un sistema no formador de imágenes o un sistema formador de imágenes depende mucho de la fuente de luz y la aplicación deseada. El número de Fresnel FN es utilizado como una guía para esto, el cual es dado por la ecuación (3.14):

$$FN \approx \frac{P_{LA} \cdot D_{FT}}{4 \cdot \lambda \cdot f_{FL}} \quad (3.14)$$

El número de Fresnel FN de un homogeneizador de haz de micro-lentes define a P_{LA} como el pitch de la matriz de micro-lentes, a D_{FT} como la dimensión del perfil de intensidad flat top o superficie plana, en el plano de homogeneización FP, f_{FL} es la longitud focal de la lente de campo FL y λ es la longitud de onda. En la figura 3.11 se muestra el ejemplo de un haz con distribución guassiana, convertido a haz con distribución de superficie plana o flat top.

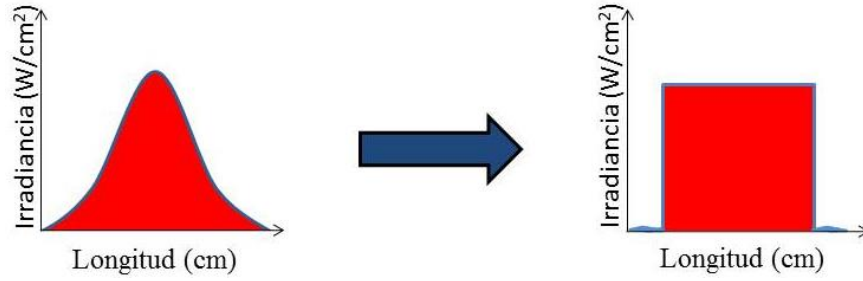


Figura 3.11. Cambio de distribución gaussiana a superficie plana.

El propósito de un sistema no formador de imágenes es el coleccionar, enfocar, dispersar o colimar luz. Algunos ejemplos de este sistema son la proyección de iluminación, acoplamiento de fibras y proyección laser. El desempeño de este tipo de sistemas puede ser cuantificado por su transmitancia, tamaño de la mancha de enfocamiento, apertura numérica NA y homogeneidad.

Los sistemas no formadores de imágenes muestran efectos de difracción debido a la difracción de Fresnel en la matriz de micro-lentes. La difracción de Fresnel está relacionada con el número de Fresnel FN . Un número de Fresnel grande da bordes más nítidos y más pequeñas variaciones del perfil de la parte superior plana. Los sistemas no formadores de imágenes deben tener un número de Fresnel $FN > 10$, mejor $FN > 100$, para obtener una buena uniformidad. Estos sistemas son muy adecuados para iluminación de zonas amplias, la dimensión de la parte superior plana o la llamada top hat, DFT es proporcional al número de Fresnel FN . Los números de Fresnel pequeños $FN < 10$ son utilizados cuando es necesario contar con una alta uniformidad, obtenido esto en los sistemas formadores de imágenes.

La homogeneización en el plano FP está localizado a la distancia focal f_{FP} detrás de la lente de campo FL . Las dimensiones del haz en el plano homogeneizado para el arreglo óptico en el cual es utilizada una matriz de multi-lentes están dadas por la D_{FT} , por medio de la ecuación (3.15):

$$D_{FT} = \left| \frac{P_{LA1} f_{FL}}{f_{LA1}} \right| \quad (3.15)$$

Donde P_{LA1} es el pitch o la distancia de separación entre centro y centro de la curvatura de cada multi-lente, f_{FL} es la distancia focal de la lente de campo, y f_{LA1} es la distancia focal de cada multi-lente.

Un sistema formador de imágenes puede proveer suficiente calidad de la imagen para permitir la extracción de información deseada acerca de un objeto desde la imagen. Este se encuentra constituido por los mismos elementos que el sistema no formador de imágenes, solo que en lugar de un arreglo de multi-lentes se encuentra constituido por dos arreglos de multi-lentes. Algunos ejemplos de un sistema formador de imágenes son la televisión, cañones y proyectores de acetatos.

El plano de homogeneización (FP) está localizado a la distancia focal f_{FP} con respecto a la lente de campo. El diámetro de la mancha del haz en el plano de homogeneización D_{FT} es dado por la ecuación (3.16):

$$D_{FT} = P_{LA1} \frac{f_{FL}}{f_{LA1} \cdot f_{LA2}} \left[(f_{LA1} + f_{LA2}) - a_{12} \right] \quad (3.16)$$

Donde $f_{LA1} < a_{12} < f_{LA1} + f_{LA2}$ y a_{12} es la separación entre el primer y el segundo arreglo de multi-lentes (LA1) y (LA2), respectivamente.

El primer arreglo de multi-lentes LA1 divide el haz incidente en múltiples pequeños haces. El segundo arreglo de multi-lentes LA2, en combinación con la lente de campo (FL) actúa como un arreglo de lentes objetivos que traslapan las imágenes de cada una de los pequeños haces del primer arreglo en el plano de homogeneización (FP) [38].

3.2.5 Películas antirreflectoras

Una película antirreflectora (AR), es una capa delgada colocada sobre cada una de las caras que componen a diferentes elementos ópticos, como lo son las lentes. Cuando la luz pasa a través de un substrato como lo es el vidrio, se tiene aproximadamente un 4% de

reflexión en cada interface, resultando un 92 % de transmisión total de la luz incidente. Al ser colocadas películas antirreflectoras en cada interface del elemento óptico, se puede reducir la reflexión que se produce al pasar luz a través del substrato de vidrio.

Las propiedades de transmisión de la película antirreflectora, película delgada o recubrimiento son dependientes de la longitud de onda de la luz que es utilizada, el índice de refracción del substrato, el índice de refracción del recubrimiento, el grosor del recubrimiento y el ángulo con el que incide la luz [39-40].

La ley de la conservación de la energía es muy importante en el análisis de lentes, películas antirreflectoras, entre otras aplicaciones, la cual define que la suma de la intensidad transmitido Γ , el reflejado σ , y el absorbido α , en cualquier material, debe ser igual al haz incidente I_0 en cualquier superficie. Esto puede ser expresado matemáticamente por la ecuación (3.17)

$$\Gamma + \sigma + \alpha = I_0 \quad (3.17)$$

En la figura 3.12 se muestra la ley de la conservación de la energía debida a los fenómenos de transmisión, reflexión, y absorción en una superficie.

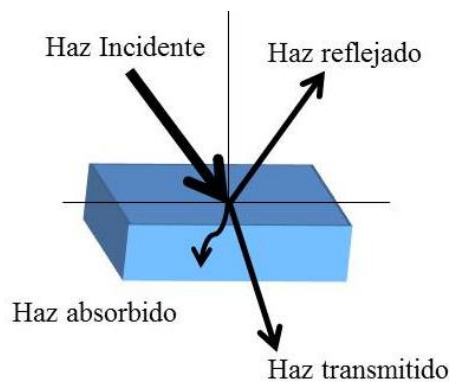


Figura 3.12. Transmisión, reflexión, y absorción de un haz incidente sobre una superficie.

Funcionamiento de capa delgada.

Las características que maneja la luz como onda es que es continua, describe los colores en función de la longitud de onda, describe la interacción de la luz con objetos cuyo tamaño son del orden de longitudes de onda, tiene una frecuencia y para su análisis son aplicadas las ecuaciones de Maxwell.

La interferencia sucede cuando dos o más ondas se superponen para formar una onda resultante de mayor o menor amplitud. Cuando la interferencia es constructiva, dos ondas con la misma fase son superpuestas, produciendo una onda resultante de mayor amplitud. La interferencia destructiva se produce cuando las dos ondas atenúan el movimiento ondulatorio al estar desfasadas 180° una de la otra, obteniendo una onda de menor amplitud o la cancelación de la misma. En la figura 3.13 Se muestra el ejemplo de interferencia constructiva e interferencia destructiva.

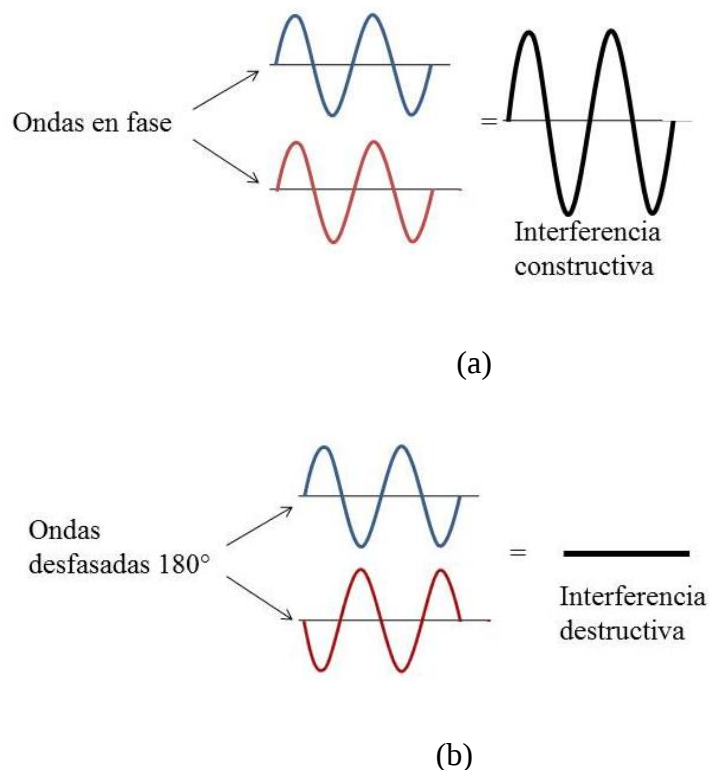


Figura 3.13. Interferencia de dos ondas: (a) constructiva y (b) destructiva.

Cuando es aplicada una película delgada, sucede la reflexión del haz (onda) en la superficie de la película delgada y en el substrato en donde fue colocada la película delgada, produciéndose un desfase de 180° entre los haces, dándose una interferencia destructiva cuando estos salen a la superficie.

El espesor de la película delgada debe ser un número impar de cuartos longitud de onda, con la finalidad de lograr la diferencia de camino deseado de una media longitud de onda entre los haces reflejados, lo que conduce a su anulación. En la figura 3.14 se muestra la anulación de los haces al ser colocada una película delgada sobre un substrato.

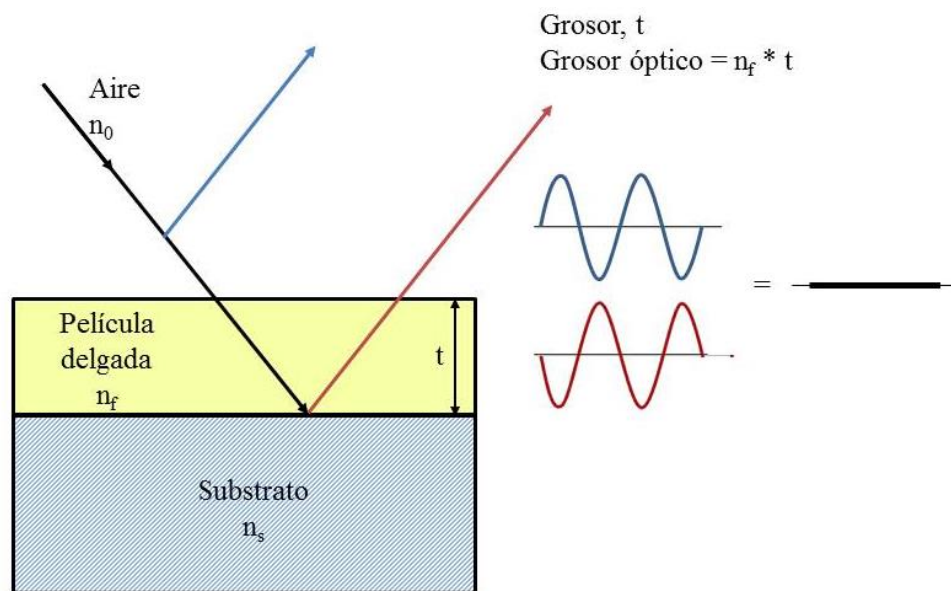


Figura 3.14. Anulación de los haces al ser colocada una película delgada sobre un substrato.

La ecuación para determinar el índice de refracción de la película delgada para la cancelación de los dos haces es dada por (3.18):

$$n_f = \sqrt{n_0 n_s} \quad (3.18)$$

Donde:

n es el índice de refracción de la película delgada

n_0 es el índice de refracción del aire (o del material incidente)

n_s es el índice de refracción del sustrato.

En el fenómeno de interferencia son utilizadas las fórmulas de Fresnel, las cuales relacionan las amplitudes de las ondas reflejadas y transmitidas, en función de la amplitud de la onda incidente.

Para el caso de sistemas ópticos, el cálculo de las pérdidas por reflexión es obtenido con el coeficiente de reflexión a incidencia normal, el cual es dependiente de los índices de refracción de los dos medios. Este coeficiente de reflexión en amplitud a incidencia normal es dado por la ecuación (3.19):

$$\gamma = \left(\frac{n_0 - n_f}{n_0 + n_f} \right) \quad (3.19)$$

Donde n_0 es el índice de refracción del medio en donde el haz incide normalmente, n_f es el índice de refracción de la película delgada anti reflejante.

Por lo que las pérdidas por reflexión o reflectancia σ , es el cociente entre la intensidad de la onda reflejada y intensidad de la onda incidente. Estas pérdidas son obtenidas a partir del coeficiente de reflexión en amplitud a incidencia normal de la ecuación (3.19), siendo dadas por el coeficiente de reflexión de intensidad a incidencia normal en (3.20):

$$\sigma = \left(\frac{n_0 - n_f}{n_0 + n_f} \right)^2 \quad (3.20)$$

La transmitancia óptica, Γ , se define como el cociente entre intensidad de la onda transmitida y la intensidad de la onda incidente. En otras palabras, la transmitancia es la fracción de luz incidente, a una longitud de onda especificada, que pasa a través de una muestra o frontera.

Su expresión matemática es dada por (3.21):

$$\Gamma = \frac{I}{I_0} \quad (3.21)$$

donde I_0 es la intensidad del rayo incidente, e I es la intensidad de la luz que proviene de una muestra.

Partiendo de la ecuación de la ley de la conservación de la energía (3.17), también es posible obtener la transmitancia, al tenerse la consideración que en sistemas ópticos en donde son utilizadas lentes, la absorción de los materiales es casi despreciable, las pérdidas por reflexión son dadas por (3.20) y teniendo que el haz incidente $I_0=1$, la transmitancia en una de las fronteras de una lente, puede ser expresada por (3.22):

$$\Gamma = 1 - \sigma \quad (3.22)$$

La transmitancia total que proporciona un sistema óptico es obtenida al multiplicar las transmitancias de cada una de las fronteras, expresándose como en (3.23):

$$\Gamma_T = \Gamma_1 \Gamma_2 \Gamma_3 \dots \Gamma_n \quad (3.23)$$

La transmitancia de una lente es un parámetro importante, ya que esta nos proporciona información si el elemento permite o bloquea ciertas longitudes de onda, dependiendo del material que es utilizado.

3.3 Radiometría

La radiometría se define como la medida de la cantidad de radiación. Las cantidades radiométricas abarcan las medidas de todo el espectro electromagnético emitido por una fuente de luz [32].

A continuación se dan las notaciones y definiciones de las unidades radiométricas.

3.3.1 Unidades radiométricas

3.3.1.1 Flujo

El flujo de radiación Φ es la potencia asociada a dicha radiación. Se mide en watts si se considera la luz como radiación electromagnética o bien en fotones/s, si se le considera flujo de fotones.

3.3.1.2 Irradiancia

Es el flujo por unidad de área recibido por una superficie. Su expresión matemática es dada por (3.24):

$$E = \frac{\delta\Phi}{\delta a} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (3.24)$$

3.3.1.3 Intensidad

Es el flujo por unidad de ángulo sólido recibido por superficie. Su expresión matemática es dada por (3.25):

$$I = \frac{\delta\Phi}{\delta\Omega} \text{ (W/st)} \quad (3.25)$$

3.3.1.4 Ángulo sólido

Un estereorradián es la unidad básica de un ángulo sólido cortado de una esfera que se utiliza para describir las trayectorias angulares bidimensionales en el espacio tridimensional. Por lo tanto, el estereorradián se define como el ángulo sólido subtendido desde el centro de una esfera con un radio de r por una porción de la superficie de la esfera que tiene un área de r^2 , en el que la luz se proyecta. La figura 3.15 muestra el ángulo sólido de la distribución de flujo esférico proveniente de una lámpara.

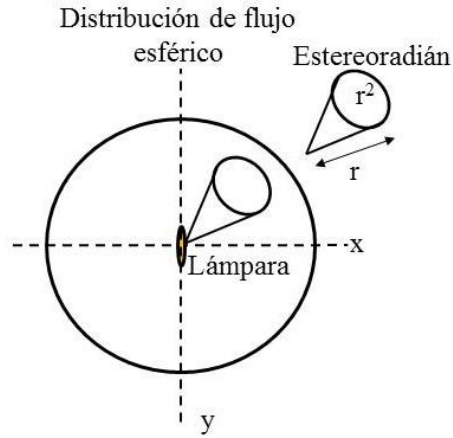


Figura 3.15. Ángulo sólido obtenido de la distribución de flujo esférico proveniente de una lámpara.

3.3.1.5 Radiancia

Es el flujo emitido por unidad de área, por unidad de ángulo sólido. La radiancia es independiente de la distancia de la fuente debido a que el área de muestra incrementa en proporción con la distancia. La medida equivalente fotométrica es la luminancia media o promedio, a menudo se expresa en unidades de candelas por metro cuadrado, y es dada por (3.26)

$$L = \frac{\delta^2 \Phi}{\delta A \delta \Omega} \text{ (W/(st} \cdot \text{cm}^2)) \quad (3.26)$$

3.3.1.6 Emitancia

Es el flujo por unidad de área emitido a todos los ángulos. Su expresión matemática es dada por (3.27):

$$M = \frac{\delta \Phi}{\delta A} \text{ (W/cm}^2) \quad (3.27)$$

En la tabla 3.1 se muestran las unidades radiométricas de las definiciones mencionadas anteriormente.

Tabla 3.1. Comparación entre unidades radiométricas

Medida	Símbolo	Unidades Radiométricas
Flujo	Φ	Watt
Irradiancia	$E = \frac{\delta\Phi}{\delta a}$	W/cm ²
Intensidad	$I = \frac{\delta\Phi}{\delta\Omega}$	W/estereoradián =W/st
Radiancia	$L = \frac{\delta^2\Phi}{\delta A\delta\Omega}$	W/(st · cm ²)
Emitancia	$M = \frac{\delta\Phi}{\delta A}$	W/cm ²

3.3.2 Fuente de luz IR

Existen diferentes fuentes de luz, como lo son las lámparas de arco y las lámparas incandescentes. Las fuentes de luz de lámpara de arco ofrecen un alta salida de ultravioleta y visible con algunas prominentes líneas en el infrarrojo cercano. Las lámparas incandescentes, como lo es la lámpara QTH (por sus siglas en inglés: Quartz Tungsten Halogen) ofrecen estabilidad y aplicaciones en el visible y el infrarrojo cercano.

3.3.2.1 Ciclo regenerativo del halógeno

La lámpara QTH está compuesta por una capsula tubular de cuarzo, rellena de gas halógeno y un filamento de tungsteno. El halógeno junto con el tungsteno crean una reacción llamada ciclo regenerativo del halógeno, la cual permite que se empiece a emitir el haz de luz cuando es aplicada energía a la lámpara y que cuando se deja de aplicar energía la lámpara casi vuelva a su estado original. El compuesto de halógeno sirve para iniciar una reacción química reversible del tungsteno evaporado del filamento de este mismo, para producir moléculas gaseosas de oxihaluro en la fase de vapor. Los gradientes térmicos

formados como resultado de la diferencia de temperatura entre el filamento caliente y la capsula fría contribuyen a la interceptación y el reciclado de tungsteno en el filamento de la lámpara a través de un fenómeno conocido como el ciclo regenerativo de halógeno, el cual se muestra en la figura 3.16. El tungsteno vaporizado reacciona con bromuro de hidrógeno para formar haluros gaseosos que posteriormente se vuelven a depositar sobre las zonas más frías del filamento en lugar de ser acumulado lentamente en las paredes internas del encapsulado.

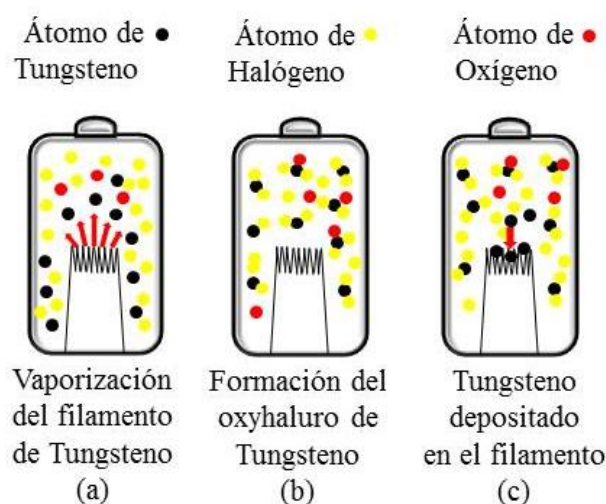


Figura 3.16. Ciclo regenerativo del Halógeno [41]

El ciclo regenerativo de halógeno puede ser dividido en tres pasos críticos que se muestran en la figura 3.16. En el inicio del proceso, la lámpara, llena de gas de halógeno, y el filamento se encuentran en equilibrio a temperatura ambiente. Cuando se aplica energía a la lámpara, la temperatura del filamento se eleva rápidamente a su temperatura de funcionamiento (aproximadamente de 2500 a 3000 ° C), una secuencia de eventos que también calientan el gas y el encapsulado. Finalmente, el encapsulado alcanza su temperatura de funcionamiento estable, entre los 400 y 1000° C, dependiendo de los parámetros de la lámpara. El diferencial de temperatura entre el filamento y el encapsulado crea gradientes térmicos y corrientes de convección del gas con el que se encuentra relleno. Una vez que el encapsulado alcanza una temperatura de aproximadamente 200 a 250°C, comienza el ciclo regenerativo de halógeno. Átomos de tungsteno evaporado del filamento, como se muestra en la figura 3.16 (a), reaccionan con el vapor de halógeno gaseoso y los

niveles de oxígeno molecular para formar oxihaluro de tungsteno como se muestra en la figura 3.16 (b). En lugar de condensarse en las paredes calientes internas del encapsulado, los compuestos de oxihaluro se hacen circular por corrientes de convección de nuevo a la región que rodea el filamento, donde se descomponen, dejando que tungsteno elemental se vuelva a depositar en las regiones más frías del filamento, como se muestra en la figura 3.16 (c). Una vez libre de la combinación del tungsteno, los compuestos de oxígeno y haluro se difunden de nuevo en el vapor para repetir el ciclo regenerativo. El lado negativo del ciclo regenerativo del halógeno, es que los átomos de tungsteno no vuelven a su posición original, sino que terminan en las regiones más frías del filamento, lo que resulta en un grosor desigual. Con el tiempo las lámparas fallan debido a la disminución de espesor de los filamentos en las regiones más calientes [41].

3.3.2.2 Radiación de cuerpo negro

Las lámparas incandescentes de tungsteno-halógeno funcionan como radiadores térmicos, es decir, la luz se genera mediante el calentamiento del filamento a una temperatura muy alta. Por lo que, cuanto mayor sea la temperatura de funcionamiento de la lámpara, mayor brillo de luz se tendrá. Todas las lámparas de tungsteno exhiben perfiles espectrales de emisión que se asemejan a la de un radiador de cuerpo negro, y el perfil de emisión espectral de las lámparas de tungsteno-halógeno es cualitativamente similar a estas lámparas. Un cuerpo negro perfecto es aquel que absorbe completamente toda la radiación incidente sobre él.

La Ley de Planck describe la emitancia radiante espectral de un cuerpo negro perfecto, en función de la temperatura y longitud de onda de radiación emitida, como se muestra en la ecuación (3.28):

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (3.28)$$

dónde:

W_λ = radiación emitida en un hemisferio por el cuerpo negro medida en potencia por unidad de área por intervalo de longitud de onda ($W\text{ cm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$).

λ = longitud de onda (μm)

e = base del logaritmo natural (2.718...)

T = Temperatura del cuerpo negro en Kelvin (Kelvin = $^{\circ}\text{C} + 273$)

C_1 = una constante = 3.742×10^4 cuando el área es en centímetros cuadrados y la longitud de onda en micrómetros.

C_2 = una constante = 1.4388×10^4 cuando centímetros cuadrados y micrómetros son usados.

Si es integrada la ecuación (3.28) se puede obtener la radiación total para todas las longitudes de onda. La ecuación resultante es conocida como la Ley de Stefan-Boltzman, la cual es mostrada en la ecuación (3.29):

$$W_{TOT} = 5.67 \times 10^{-12} T^4 W/cm^2 \quad (3.29)$$

La cual indica que la potencia total radiada por un cuerpo negro varia como la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

Si derivamos la ecuación de Planck (3.24) e igualamos el resultado a cero, se puede determinar la longitud de onda a la cual la emitancia espectral o irradiancia (W_λ) es un máximo y también la cantidad de W_λ a esta longitud de onda. La ley de desplazamiento de Wien proporciona la longitud de onda para la máxima W_λ la cual se muestra en la ecuación (3.30):

$$\lambda_{max} = 2897.8 T^{-1} \mu\text{m} \quad (3.30)$$

Y W_λ a λ_{max} como en la ecuación (3.31)

$$W_{\lambda,max} = 1.286 \times 10^{-15} T^5 W/cm^2 \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (3.31)$$

En el caso de un radiador de cuerpo negro ideal, la temperatura de color que se percibe es igual a la temperatura real del material del radiador. En la práctica, sin embargo,

en el caso de la lámpara, la radiación total exhibida por la fuente de emisión es menor de lo que podría esperarse de un cuerpo negro. La temperatura del color se expresa en grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$), mientras que la temperatura real medida más práctica se expresa en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). En la figura 3.17 se muestra la distribución espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas y longitudes de onda.

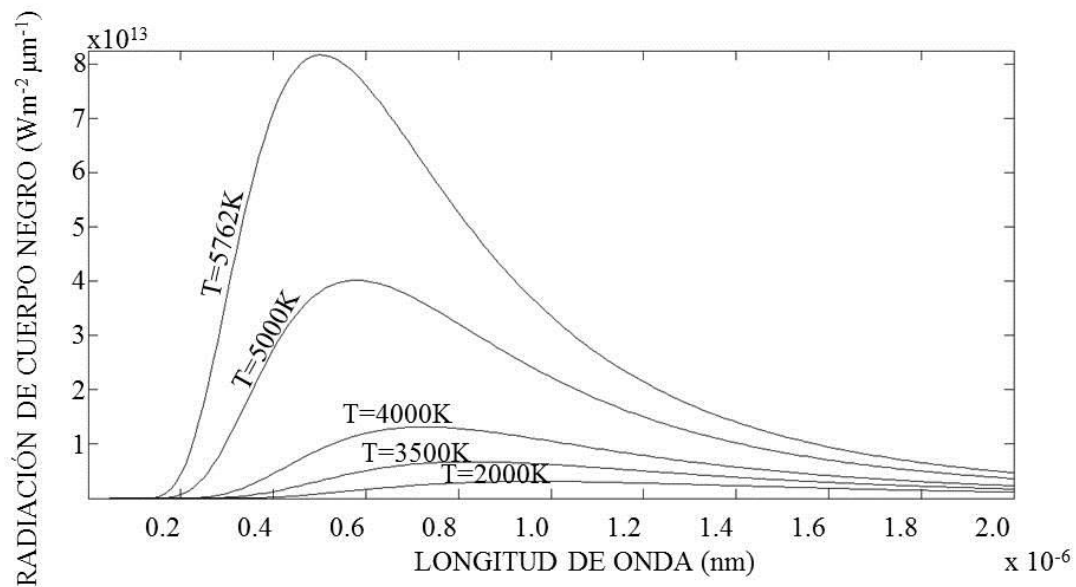


Figura 3.17. Distribución espectral de un cuerpo negro.

3.3.2.3 Radiación de cuerpo gris

Como radiadores incandescentes, las lámparas de tungsteno-halógeno generan un espectro continuo de luz que va desde el ultravioleta central a través de la visible y en las regiones de longitud de onda del infrarrojo.

La mayoría de los radiadores térmicos no son cuerpos negros perfectos, como es el caso de la lámpara de tungsteno-halógeno, los cuales reciben el nombre de cuerpos grises. Un cuerpo gris es el que emite radiación en exactamente la misma distribución espectral que un cuerpo negro a la misma temperatura, pero con menor intensidad. La emisividad total (ϵ) de un cuerpo

es la relación entre su emitancia radiante total a la de un cuerpo negro perfecto a la misma temperatura, como se muestra en la ecuación (3.31):

$$Emisividad(\lambda, T) = \frac{I_{Lámpara}(\lambda, T)}{I_{Cuerpo Negro}(\lambda, T)} \quad (3.31)$$

La emisividad es por lo tanto, una medida de la radiación y la eficiencia de absorción de un cuerpo. La tabla 3.2 muestra la emisividad total del tungsteno, la cual varía con la longitud de onda y con la temperatura [32].

Tabla 3.2. Emisividad total del Tungsteno

Material	Temperatura °K	Emisividad total
Tungsteno	500	0.05
	1000	0.11
	2000	0.26
	3000	0.33
	3500	0.35

Capítulo 4

Arreglos ópticos y simulaciones

4.1 Introducción

Partiendo de la teoría obtenida del capítulo 3 de Fundamentos de Óptica, se realizó una revisión bibliográfica de sistemas comerciales los cuales pueden re-trabajar componentes BGA's por medio de luz IR [21-22, 24,26], así como las características físicas y de funcionamiento de dichos sistemas. Se observó, en la patente del sistema original [26], que el número de componentes ópticos utilizados para lograr una adecuada temperatura con distribución uniforme en el dispositivo BGA que se desea re-trabajar es de 8 elementos ópticos. Esta patente fue registrada a finales de los 80's, en la actualidad existen nuevos elementos ópticos, los cuales pueden mejorar el desempeño del sistema, utilizando una cantidad menor de elementos. Por este motivo, para realizar un diseño eficiente del prototipo soldador de componentes BGA por medio de luz IR (FILSS), y en el cual puedan ser utilizados una menor cantidad de elementos ópticos, fueron seleccionados sistemas de iluminación actuales, los cuales proporcionen una distribución de luz uniforme, ésto debido a la teoría de que si estos sistemas ofrecen una distribución uniforme de luz, también pueden ofrecer una distribución uniforme de temperatura.

Los sistemas de iluminación en los cuales se encuentra basado el prototipo soldador de componentes BGA (FILSS) son sistemas comerciales con distribuciones uniformes de luz. Son cuatro los arreglos ópticos propuestos para la FILSS, los cuales se basan en el sistema de iluminación Köhler, así como en un sistema no formador de imágenes y un sistema formador de imágenes [38,41]

Con la finalidad de simular los arreglos ópticos para FILSS, se encontró que el software ZemaxTM es un programa de simulación de sistemas ópticos, el cual ofrece capacidad para diseño de lentes, diseño de fuentes de luz, diseño óptico en el espacio libre, así como muchas otras aplicaciones. Ésto permite obtener una aproximación a los valores reales obtenidos experimentalmente, además de que es fácil de utilizar, cuenta con versatilidad, alta velocidad, capacidad para el diseño de sistemas especializados, así como funcionalidad que acelera el proceso del diseño, entre otras ventajas.

Dentro de esta plataforma son encontrados dos modos para realizar las simulaciones. El primero es el modo secuencial, en el que todos los rayos de propagación se producen a través de superficies las cuales se encuentran localizadas en un mismo sistema de coordenadas local. El segundo es el modo no-secuencial, en el que los componentes ópticos son modelados como objetos en tres dimensiones, ya sea como superficies o volúmenes sólidos. Cada objeto es colocado en las coordenadas x, y, z con una orientación definida independientemente.

Por tal motivo, el programa ZemaxTM fue seleccionado como plataforma de simulación para cada uno de los arreglos ópticos propuestos para FILSS. Varias simulaciones fueron ejecutadas utilizando este programa. Los resultados que fueron analizados son el tamaño de la mancha de luz obtenida a la salida de cada uno de los arreglos ópticos para FILSS, así como su irradiancia o distribución espacial de luz.

El modo seleccionado para realizar los diseños en ZemaxTM, fue el modo no-secuencial, ya que permite obtener resultados más completos, sin importar la orientación de los elementos ópticos para FILSS.

Como fuente de luz en todos los sistemas seleccionados como prototipos soldadores de componentes BGA's (FILSS), fue seleccionada una lámpara incandescente de Cuarzo-Tungsteno-Halógeno (QTH), de acuerdo a las características que presentan este tipo de lámparas, como los son el ciclo regenerativo del halógeno y un amplio espectro de emisión que se asemeja al de un cuerpo gris que se mencionó en el capítulo 3. Para esto fue seleccionada una lámpara comercial que cuenta con las características suficientes que necesitan los sistemas para realizar el re-trabajo, como lo es la temperatura máxima

alcanzada. El resto de los elementos ópticos propuestos para FILSS, fueron seleccionados de proveedores, según las necesidades que se fueron encontrando durante el proceso de simulación. Una vez seleccionados los elementos que integran los arreglos ópticos para FILSS, se prosiguió con la simulación de dichos elementos, los cuales se presentan a continuación.

4.2 Parámetros de simulación utilizados en todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS

4.2.1 Reflector elíptico

El primer elemento óptico diseñado en ZemaxTM, de los arreglos ópticos para FILSS, fue el reflector de la lámpara. La forma de este elemento es elíptica por lo que su función es el concentrar la luz que es emitida desde el filamento, ubicado en el primer foco de la elipse F_1 hacia el segundo foco F_2 en el eje óptico central, a una distancia definida desde el reflector. En la lámpara utilizada, el primer foco F_1 se encuentra localizado a la distancia de trabajo de la lámpara, $a=19mm$, como se muestra en la figura 4.1. El diámetro d de la lámpara es de 51mm, mientras que la longitud de la lámpara l es de 45mm [42]. El ángulo máximo θ_{max} con el que el haz de luz puede incidir en el foco F_2 , considerando la ecuación (3.1) y que $PF_1 = PF_2 = 19mm$ distancia la cual corresponde al extremo del reflector, se obtiene la ecuación (4.1)

$$\theta_{max} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{PF_1}{\text{dist } F_1 a F_2} \right) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{19mm}{38mm} \right) = 30^\circ \quad (4.1)$$

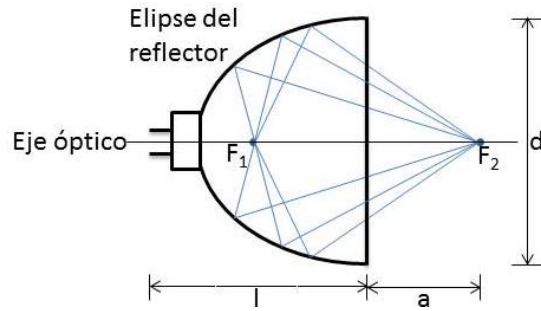


Figura 4.1. Trazo de rayos del reflector elíptico.

Para el diseño de este elemento fue utilizada una superficie estándar, (Standard Surface en inglés) dentro de la plataforma ZemaxTM, para modelar la elipse del reflector. Dos parámetros que deben ser calculados e introducidos en este tipo de superficie son el radio y la constante cónica. El radio R (el recíproco de la curvatura c) es obtenido a partir de la ecuación (4.2):

$$R = \frac{1}{c} = \pm \frac{b^2}{a} \quad (4.2)$$

Donde a es el semieje de mayor longitud, y b es el semieje de menor longitud de la elipse. Tomando en cuenta que en la lámpara utilizada, el semieje menor $b=25.5mm$ y el semieje mayor $a= 28.27mm$, siendo este último una aproximación del semieje mayor, el radio obtenido es dado en (4.3):

$$R = \pm \frac{(25.5)^2}{28.27} = 23 \quad (4.3)$$

El valor de la constante cónica k , para obtener la superficie elíptica, debe de encontrarse en el rango de entre -1 y 0. Su ecuación está expresada en (4.3):

$$k = - \left[\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right] \quad (4.3)$$

La constante cónica obtenida a partir de los valores del semieje mayor y menor para esta lámpara es dada por (4.4):

$$k = - \left[\frac{28.27^2 - 25.5^2}{28.27^2} \right] = -0.2 \quad (4.4)$$

Además de estos dos parámetros, en ZemaxTM deben de especificarse la abertura máxima, Maximum Aper, la cual es el valor del semieje menor de la elipse $b = 25.5\text{mm}$ y la abertura mínima, Minimum Aper, valor aproximadamente de 4mm , abertura ubicada en la parte posterior de la lámpara. Además, el material del reflector debe de ser especificado, siendo de “mirror”, (espejo en inglés), ésto con la finalidad de obtener la reflexión del haz. En la figura 4.2 se muestra el reflector elíptico diseñado en el simulador ZemaxTM, de la lámpara utilizada como fuente de luz para el prototipo FILSS.

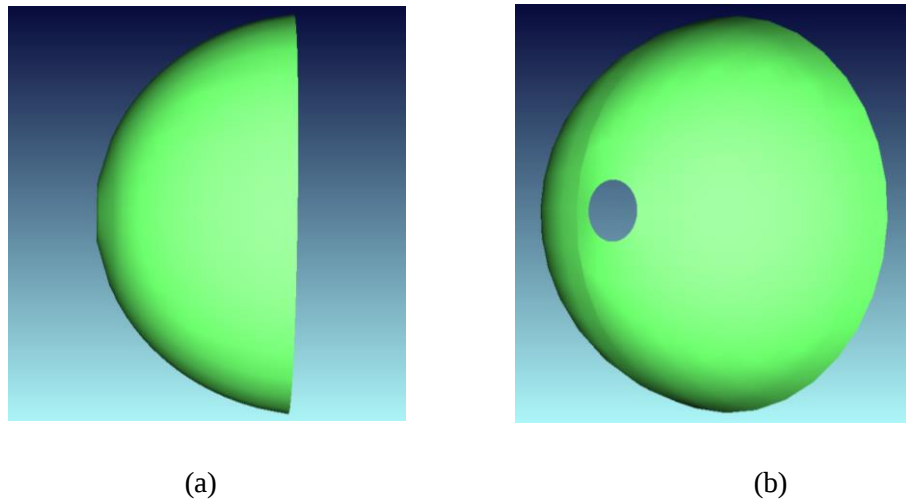


Figura 4.2. Diseño del reflector elíptico, (a) cara exterior, (b) con perspectiva.

4.2.2 Filamento

Los parámetros necesarios para el diseño físico del filamento que utiliza la lámpara QTH en la plataforma de simulación ZemaxTM, son: la longitud $length=4\text{mm}$, el radio $radius=1.5\text{ mm}$, y el número de vueltas del filamento, $turns=10$, como se muestra la figura 4.3.

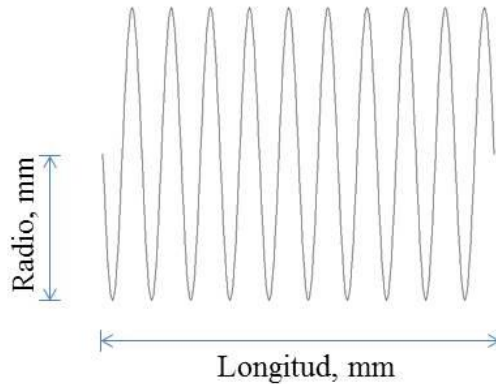


Figura 4.3. Diseño del filamento.

Otros parámetros importantes son la potencia óptica (Power (Watts)) emitida por el filamento, la cual es obtenida a partir del cálculo de la potencia de salida, propuesta en [33], y las longitudes de onda que emite, asignadas por nivel o pesos de acuerdo al espectro de emisión de la misma.

Para obtener la potencia total de salida en un rango espectral especificado, son llevados a cabo los siguientes pasos:

1. Se calcula el promedio de irradiancia en el intervalo deseado de longitud de onda λ_1 y λ_2 de acuerdo a la gráfica.
2. Se multiplica la irradiancia total, en mWm^{-2} obtenida del paso 1, por un factor de conversión dada en [33], donde es dependiente del tipo de lámpara y el condensador utilizados. El resultado debe ser en mW.
3. Si es utilizado un reflector en la lámpara, como en este caso, es multiplicado el valor obtenido del paso 2 por 1.6.

Por lo que para seguir estos pasos especificados en [33], primero es necesario contar con la gráfica del espectro de emisión de la lámpara. En la figura 4.4 se muestra la gráfica del espectro de emisión que manejan lámparas QTH con potencias de consumo eléctrico de 100W y 250W. La lámpara utilizada en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, corresponde a una lámpara QTH de 150W, la cual en esta figura se hizo una aproximación de los valores correspondientes en el espectro, obtenidos a partir de la lámpara QTH de 100W y 250W.

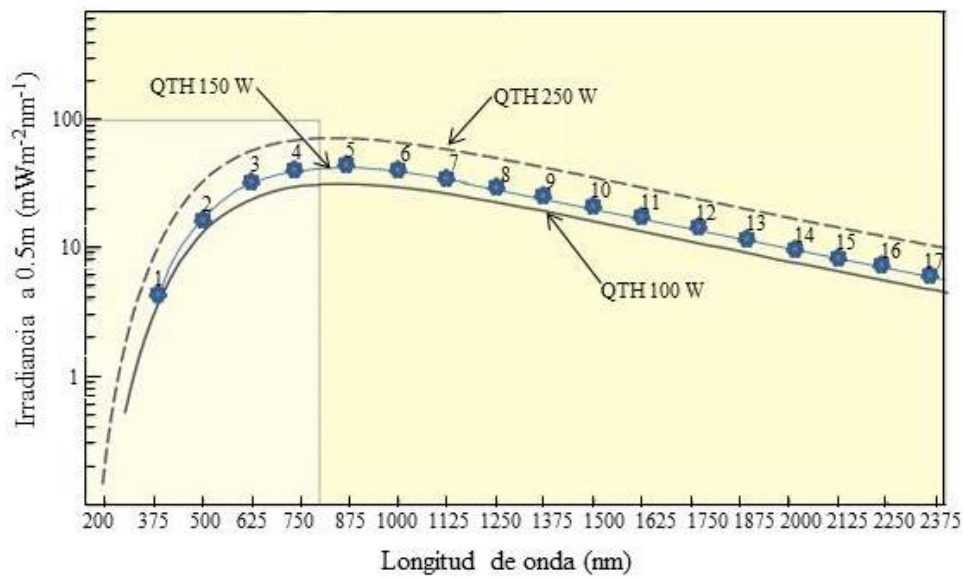


Figura 4.4. Espectro de emisión de lámparas QTH de 100W, 150W y 200W.

En el paso 1, es obtenida la irradiancia promedio aproximada en un rango espectral de 375 nm a 2375nm para la lámpara QTH de 150 W, la cual es dada en (4.5):

$$24 \text{ mW}/\text{m}^2\text{nm} \times 2000\text{nm} = 48000 \text{ mW}/\text{m}^2 \quad (4.5)$$

En el paso 2, se multiplica el valor obtenido en (4.5) por el factor de conversión, el cual, de acuerdo a las características de la lámpara y condensador seleccionado en [33], es de 0.13, quedando la potencia como en (4.6):

$$(48000 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}) \times 0.13 = 6240 \text{ mW} = 6.24 \text{ W} \quad (4.6)$$

Finalmente, el uso del reflector incrementa la potencia de salida en un 60% adicional, por lo que en (4.7) se muestra el valor obtenido:

$$6.24 \text{ W} (1.6) = 9.9 \text{ W} \quad (4.7)$$

Una vez especificada la potencia óptica en ZemaxTM, es necesario determinar el rango de longitudes que van a ser emitidas por este filamento, así como de valor del rango al que corresponde cada una de estas longitudes de onda.

La longitud de onda a la cual W_λ es la máxima, es dada en la ecuación (3.8), obteniendo este valor en (4.8):

$$\lambda_{max} = 2897.8(3500)^{-1} \mu\text{m} = 0.875 \mu\text{m} \quad (4.8)$$

Por lo que a λ_{max} es asignada como la longitud de onda con peso=1. Así, al resto de longitudes de onda emitidas por esta lámpara, las cuales abarcan del ultravioleta UV hasta el infrarrojo IR cercano, fueron asignados diferentes pesos, los cuales son mostrados en la figura 4.3 sobre la gráfica de la lámpara QTH de 150W y en la tabla 4.1, valores los cuales son equidistantes en su longitud de onda, con la finalidad de tener una aproximación al espectro de emisión de la lámpara.

Tabla 4.1. Espectro de emisión de la lámpara

	Longitud de onda (μm)	Peso
1.	0.375	0.11
2.	0.5	0.44
3.	0.625	0.68
4.	0.75	0.88
5.	0.875	1
6.	1	0.88
7.	1.125	0.77
8.	1.25	0.66
9.	1.375	0.55
10.	1.5	0.48
11.	1.625	0.4
12.	1.75	0.31
13.	1.875	0.28
14.	2	0.26
15.	2.125	0.22
16.	2.25	0.18
17.	2.4	0.15

4.2.3 Lente condensadora

Como lente condensadora en los sistemas ópticos propuestos para FILSS, fue seleccionada una lente asférica, la cual según sus características, mencionadas en el Capítulo 3, puede corregir la aberración esférica y permite obtener una mejor colimación del haz de luz.

Esta lente fue seleccionada del catálogo de lentes que proporciona ZemaxTM, en donde se tienen una amplia gama de proveedores de lentes.

Las características de la lente seleccionada fueron: distancia focal $f_l=40mm$, diámetro $d=50mm$.

Tomando en cuenta el espectro de emisión de la lámpara, en la mayoría de los sistemas propuestos, esta lente, así como la mayoría de los elementos ópticos son de material cuarzo fundido grado UV (UV SiO₂); el cual cuenta con una ventana de transmisión que empata con las longitudes de onda correspondientes al espectro de emisión de la lámpara QTH. En la figura 4.5 se muestra la ventana de emisión para UV SiO₂ [43].

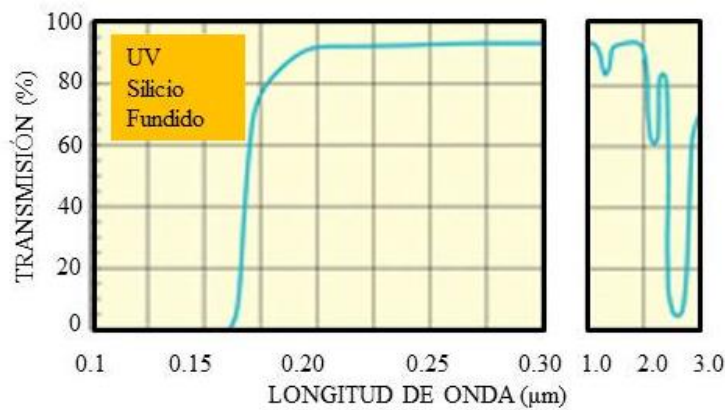


Figura 4.5. Ventana de transmisión del material UV SiO₂.

La lente seleccionada como lente condensadora fue del proveedor Edmund Optics, con número de parte: 67266. En la figura 4.6 se muestra la lente esférica seleccionada del catálogo de ZemaxTM.

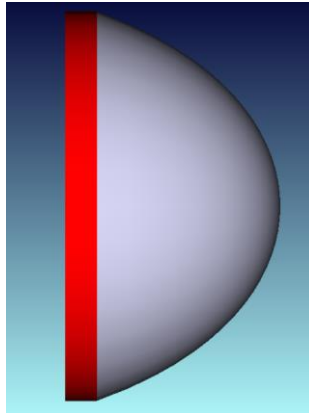


Figura 4.6. Lente esférica utilizada en el simulador ZemaxTM.

Un detector fue colocado en todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS, con la finalidad de obtener el tamaño de mancha de luz e irradiancia a la salida de los sistemas.

El tipo de detector seleccionado fue rectangular, con un área de 40 x 40 mm de área y una resolución de 250x250 pixeles en los ejes *X* y *Y*.

A continuación se presentan los sistemas ópticos propuestos para FILSS, los parámetros de simulación de cada uno de los sistemas, el trazo de rayos que arrojan los sistemas, así como los resultados de las simulaciones hechas.

4.3 Arreglo Básico

El primer arreglo óptico propuesto como posible sistema soldador de componentes BGA's (FILSS), el cual lleva el nombre de arreglo básico, está basado en un sistema de iluminación Köhler, un sistema muy utilizado en microscopía para crear una iluminación

uniforme sobre un espécimen. Este arreglo óptico es el más sencillo de todos los arreglos propuestos, al contar con la menor cantidad de elementos ópticos que lo integran. Los sistemas de iluminación Khöler se encuentran constituidos principalmente por una fuente de luz, una lente condensadora y una lente secundaria. La función de la fuente de luz es el emitir un haz, el cual por lo general llega divergiendo a la lente condensadora. La función de esta última es el de coleccionar y colimar el haz de luz guiándolo hacia la lente secundaria, permitiendo esta última variar el tamaño de la mancha de luz. En la figura 4.7 se muestra el arreglo básico propuesto.

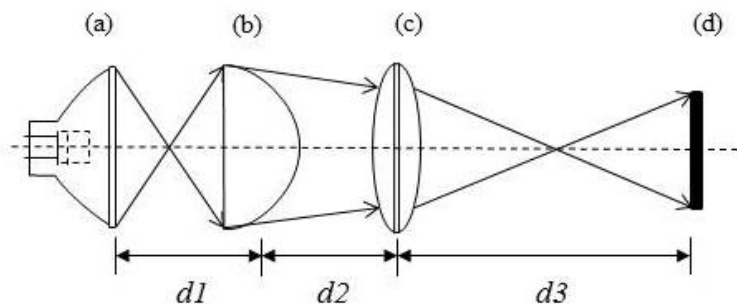


Figura 4.7. Arreglo básico propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) lente condensadora, (c) lente secundaria, (d) detector.

4.3.1 Parámetros de simulación para el arreglo básico

En la sección 4.2 de este capítulo, son explicados los parámetros considerados para la simulación de la lámpara y la lente condensadora, utilizadas en todos los arreglos ópticos para FILSS.

Como lente secundaria, en este arreglo, fue seleccionada una lente convergente, la cual permite variar el tamaño de la mancha de luz a la salida del sistema. Este tipo de lente puede ser del tipo plano-convexa o biconvexa, siendo una lente biconvexa la lente seleccionada del catálogo de proveedores de ZemaxTM. Los parámetros de simulación seleccionados para la lente secundaria son: distancia focal $f_l=150mm$, diámetro $d=50mm$, hecha en material SiO_2 . El proveedor de la lente es JML, con número de parte:

FBX12488000.1. En la figura 4.8 se muestra la lente biconvexa utilizada en la plataforma de simulación ZemaxTM.

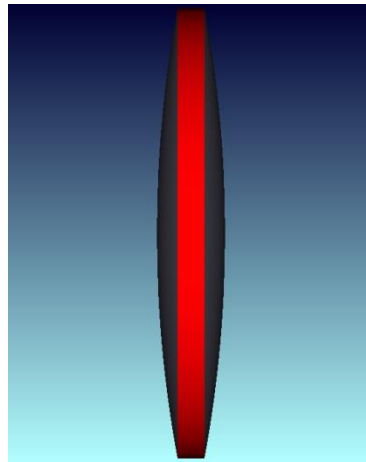


Figura 4.8. Lente secundaria utilizada en el simulador ZemaxTM.

Las distancias de separación entre cada uno de los elementos del arreglo básico, así como en todos los arreglos ópticos propuestos, se basaron en las características que presentaban cada uno de los componentes. La distancia $d1$ de la figura 4.7, corresponde al doble de la distancia de trabajo de la lámpara, con la finalidad de obtener la mayor colección del haz de luz proveniente de la lámpara. La distancia $d2$ es aproximadamente la distancia focal de la lente, permitiendo el guiado de luz hacia la lente secundaria. Por último, la distancia $d3$, distancia de separación entre la lente secundaria y el detector, es una distancia mayor que la distancia focal de la lente secundaria, obteniendo un determinado tamaño de mancha. En la tabla 4.2 se muestran las distancias de separación utilizadas para el arreglo básico propuesto para FILSS.

Tabla 4.2. Distancias de separación entre elementos en el arreglo básico para FILSS.

	<i>d1</i> (mm)	<i>d2</i> (mm)	<i>d3</i> (mm)
Arreglo Básico	44	25	162

4.3.2 Trazo de rayos

Una vez integrados todos los elementos ópticos en la plataforma ZemaxTM, se prosiguió con el análisis de trazo de rayos, siendo este último proporcionado por el simulador en 3D. Para el trazo de rayos se puede seleccionar el número de rayos que se desean simular, el cual puede ser modificado en los parámetros de simulación del filamento. En la figura 4.9 se muestra el trazo de rayos del arreglo básico para FILSS arrojado por la plataforma ZemaxTM, con un número de 150 rayos simulados. De este trazo de rayos puede observarse, como cada uno de los elementos cumplen con su función, obteniendo el guiado de los rayos emitidos de la lámpara hacia el detector. Sin embargo, también se puede observar que hay pérdidas de rayos en la lámpara, así como por las lentes. La pérdida de rayos de la lámpara se debe a que el filamento emite en todas las direcciones, teniéndose solo control en aquellos rayos que son reflejados por el reflector elíptico y perdiéndose el resto de ellos. En el caso de las lentes utilizadas, la pérdida de rayos se debe a que no son utilizadas películas antirreflectoras sobre estas, teniéndose el fenómeno de reflexión sobre las lentes, como se comentó en el capítulo 3.

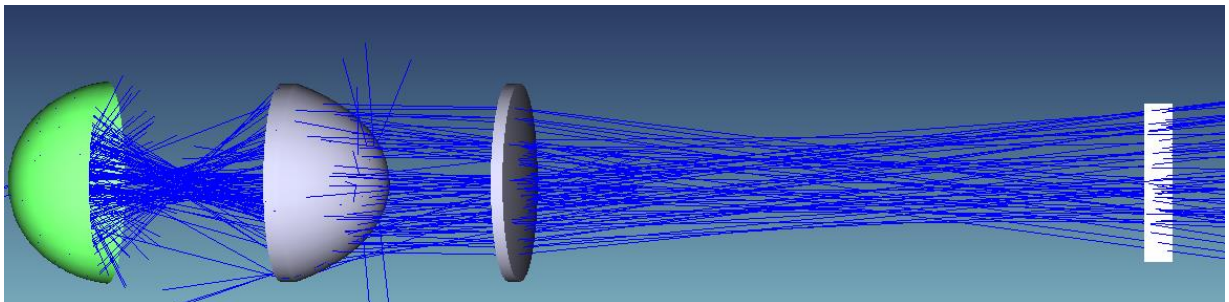


Figura 4.9. Trazo de rayos del arreglo básico propuesto para FILSS generado en el simulador ZemaxTM.

4.3.3 Resultados de las simulaciones

Los resultados obtenidos de las simulaciones en ZemaxTM, como lo es la distribución espacial del haz de salida o irradiancia, están basadas en el método de Propagación de Óptica Física (POP, por sus siglas en inglés Physical Optics Propagation), la cual utiliza cálculos de difracción (fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de éstas al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija) para propagar el frente de onda a través de una superficie a otra del sistema óptico. Para que se propague el haz de esta manera, los algoritmos de espectro de propagación angular o de difracción de Fresnel, son utilizados. El simulador selecciona automáticamente el algoritmo que produce la más alta precisión numérica. Los algoritmos de propagación por difracción producen resultados correctos para cualquier distancia de propagación, para cualquier haz arbitrario, así como para cualquier abertura en la superficie, incluyendo aberturas definidas por el usuario [44].

Los resultados obtenidos de las simulaciones hechas en todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS, pueden dividirse en dos partes: tamaño de la mancha de luz e irradiancia.

En la figura 4.10 se muestra la mancha de luz obtenida en el detector, a la salida del arreglo básico para FILSS. En esta figura puede observarse que la forma de la distribución de luz, contiene información del filamento de la lámpara utilizada, debido a que no contiene ningún elemento de homogeneización en el arreglo óptico. Por lo que la distribución de luz o irradiancia en este arreglo óptico es no uniforme, con un diámetro de la mancha estimado de 30 mm.

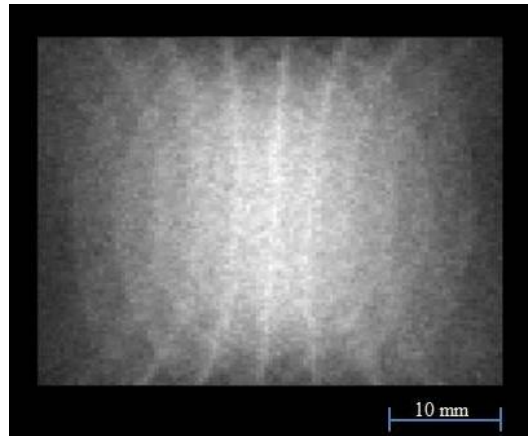


Figura 4.10. Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo básico para FILSS.

4.4 Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado

El segundo arreglo óptico propuesto para FILSS, está basado en un sistema de iluminación Köhler, en el cual es añadido un difusor de vidrio esmerilado como homogeneizador del haz. Al ser añadido el difusor al arreglo óptico, se crea una iluminación con mayor uniformidad en el área que se desea iluminar. Los elementos que integran este arreglo óptico son: una fuente de luz, un homogeneizador del haz, una lente condensadora y una lente secundaria. Es importante especificar que difusor debe ser colocado entre la lámpara de luz y la lente condensadora, para la obtención de la iluminación uniforme. En la figura 4.11 se muestra el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado propuesto.

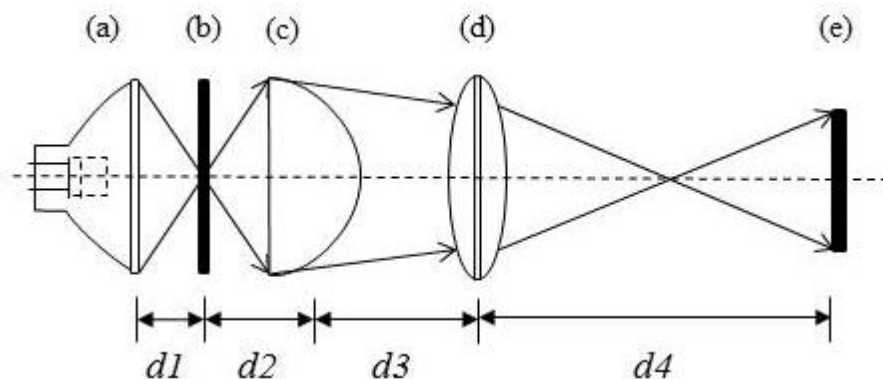


Figura 4.11. Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) difusor, (c) lente condensadora, (d) lente secundaria, (e) detector.

4.4.1 Parámetros de simulación para el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado

La simulación en la plataforma ZemaxTM, del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado propuesto para FILSS, no pudo ser obtenida debido a que ninguno de los elementos de superficies aleatorias de la plataforma de simulación, se asemejaba a los parámetros de rugosidad de la superficie, material y grosor del difusor utilizado en este arreglo óptico. Sin embargo, a continuación se presenta en la tabla 4.3 las distancias de separación propuestas para el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado propuesto para FILSS. Estas distancias de separación, al igual que en todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS, son de acuerdo a las características que muestran cada uno de los elementos ópticos que la integran.

Tabla 4.3 Distancias de separación entre elementos en el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado para FILSS.

	$d1$ (mm)	$d2$ (mm)	$d3$ (mm)	$d4$ (mm)
Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado	21	23	40	67

4.5 Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes

El tercer arreglo óptico propuesto para FILSS, es un arreglo óptico con una matriz de multi-lentes, el cual está basado en un sistema no formador de imágenes. Este tipo de sistemas son muy utilizados cuando es requerida iluminación uniforme sobre un área grande. Los sistemas no formadores de imágenes se encuentran principalmente constituidos por una fuente de luz con reflector parabólico, una lente condensadora, un arreglo de multi-lentes y una lente de campo. La función de la fuente de luz, como en el resto de los arreglos, es el emitir un haz de luz el cual por lo general llega divergiendo a la lente condensadora, la cual colecta y colima este haz de luz. Debido a que el haz que emerge de la lente condensadora de este arreglo óptico propuesto tiene un pequeño ángulo de convergencia, por el reflector elíptico utilizado de la lámpara, fue necesario añadir un elemento el cual creara una perfecta colimación o un pequeño ángulo de divergencia de este haz para que al pasar este por la matriz de multi-lente, se obtenga la uniformidad del haz [38]. El elemento óptico que fue utilizado para crear esta divergencia del haz fue una lente divergente. En la figura 4.12 se muestra el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto.

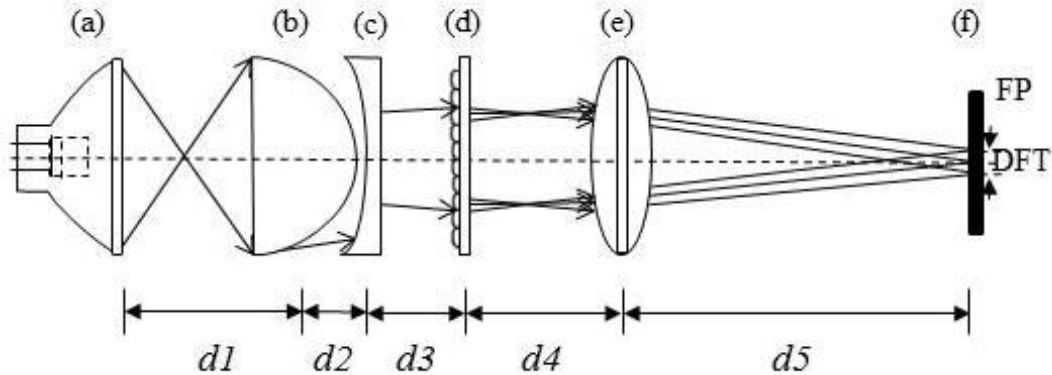


Figura 4.12. Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) lente condensadora, (c) lente divergente, (d) arreglo de multi-lentes, (e) lente de campo, (f) detector.

4.5.1 Parámetros de simulación para el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes

Como ya se mencionó anteriormente, los elementos que integran a este arreglo óptico y a todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS, son la lámpara, lente condensadora y un detector, los cuales fueron descritos en la sección 4.2 de este capítulo.

En el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes una lente divergente es colocada después de la lente condensadora. El tipo de lente divergente utilizada corresponde a una lente plano-cóncava, donde los parámetros que la caracterizan son la distancia focal $f_l = -250mm$ y un diámetro de la lente $d = 50mm$. Del catálogo de proveedores proporcionado por ZemaxTM, fue seleccionada la lente con número de parte FPV12650000 del proveedor JML.

El siguiente elemento utilizado en este arreglo óptico fue la matriz de multi-lentes, la cual fue diseñada basándose en la matriz de multi-lentes del proveedor Edmund Optics. El tipo de superficie utilizada para el diseño de esta matriz de multi-lentes, es una lenslet array.

La matriz de multi-lentes, se encuentra integrada por pequeñas lentes tipo plano convexas. Para obtener el radio de curvatura de cada una de estas pequeñas lentes fue utilizada la ecuación (3.5), considerando que cuentan con una distancia focal $f = 38.1mm$, de material B270 con índice de refracción $n = 1.53$. Al ser una lente plano convexa, el lado plano corresponde a un radio $R_2 = \infty$, por lo que despejando R_1 , el resultado queda expresado en (4.9) como:

$$R_1 = (38.1mm)(1.53 - 1) \approx 20mm \quad (4.9)$$

El parámetro de la constante cónica utilizado en este diseño fue $k = -1$, para obtener la forma convexa, valor el cual corresponde a una parábola. El tamaño de cada una de las pequeñas lentes que integran a esta matriz fue de $3mm \times 4mm$, acomodadas en forma matricial de 10 lentes sobre el eje X, y 13 lentes sobre el eje Y, con un grosor del arreglo de

3mm. En la figura 4.13 se muestra la matriz de multi-lentes diseñada en la plataforma de simulación ZemaxTM.

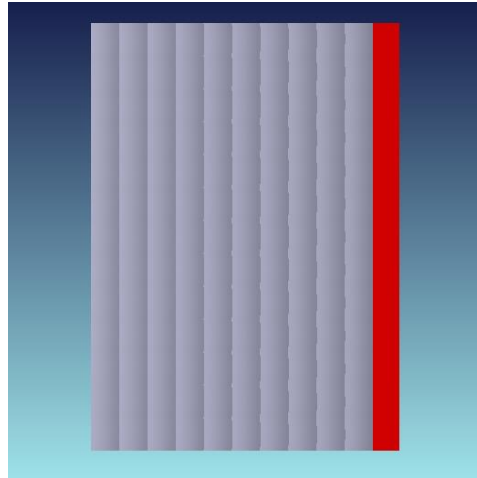


Figura 4.13. Matriz de multi-lentes utilizada en el simulador ZemaxTM.

Como ya se comentó, el material utilizado en las matrices de multi-lentes corresponde al vidrio B270, un material con características similares al de UV Sílice Fundido. En la figura 4.14 se muestra la ventana de transmisión correspondiente al material B270.



Figura 4.14. Ventana de transmisión del material B270.

La lente de campo utilizada en los arreglos donde son utilizados los arreglos de multi-lentes, corresponde a la lente biconvexa utilizada lente secundaria en el arreglo básico propuesto para FILSS. Para obtener la distancia de separación en el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes, fueron utilizadas las características que presentan este tipo de arreglos presentado en el capítulo 3. En la tabla 4.4 se muestran las distancias de separación utilizadas en el arreglo optico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.

Tabla 4.4. Distancias de separación entre elementos en el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.

	<i>d1</i> (mm)	<i>d2</i> (mm)	<i>d3</i> (mm)	<i>d4</i> (mm)	<i>d5</i> (mm)
Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes	44	6	67	78.2	150

4.5.2 Trazo de rayos

En la figura 4.15 se muestra el trazo de rayos del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS obtenido de la plataforma ZemaxTM, con un número de 150 rayos simulados.

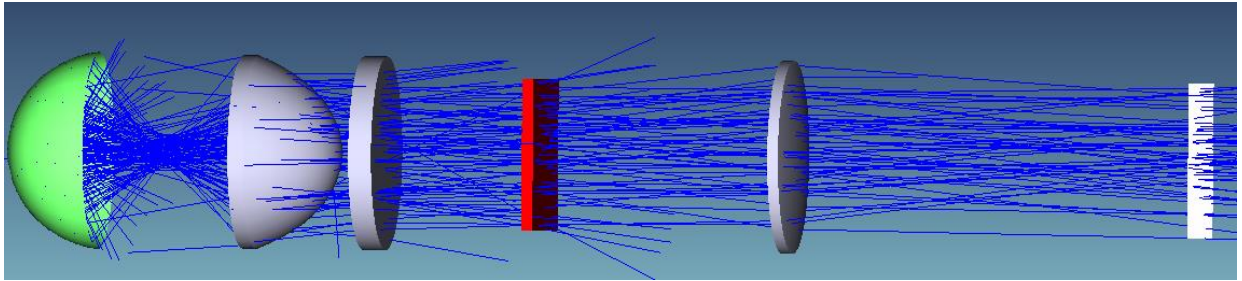


Figura 4.15. Trazo de rayos del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesta para FILSS generado en el simulador ZemaxTM.

4.5.3 Resultados de las simulaciones

En la figura 4.16 se muestra la mancha de luz obtenida en el detector, a la salida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS. En esta figura se puede observar que el filamento se ha desvanecido, lo cual demuestra la función de homogenización de irradiancia de este arreglo óptico.

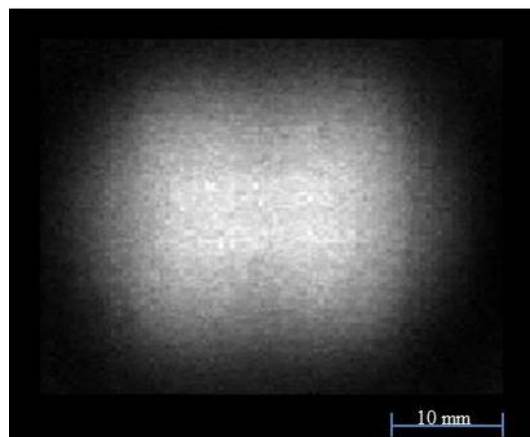


Figura 4.16. Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.

Debido a que la forma de las lentes utilizadas en la matriz de multi-lentes son de forma rectangular, de 3mm x 4mm, se puede apreciar en esta imagen que la mancha de luz tuviera una forma rectangular. Por lo tanto, el tamaño de la mancha de luz calculada D_{FT} es obtenido en el eje vertical y horizontal a partir de la ecuación (3.15), quedando para el eje vertical como en (4.10):

$$D_{FT} = \left| \frac{3mm \cdot 150mm}{38.1mm} \right| = 11.81mm \quad (4.10)$$

Y para el eje horizontal como en (4.11):

$$D_{FT} = \left| \frac{4mm \cdot 150mm}{38.1mm} \right| = 15.74mm \quad (4.11)$$

Estos valores calculados de la D_{FT} se aproximan a los valores de los ejes verticales y horizontales obtenidos de la simulación del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuestos para FILSS, los cuales se estiman que son de 15.8mm x 11.9mm aproximadamente.

4.6 Arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes

El cuarto y último arreglo óptico propuesto para FILSS de esta tesis, es un arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes, el cual está basado en un sistema formador de imágenes. Este tipo de sistemas son utilizados cuando es requerida una iluminación con mejor uniformidad (flat top o top hat) sobre un área pequeña. Los sistemas formadores de imágenes se encuentra constituidos por los mismos elementos que el sistema no formador de imágenes, definido en la sección 4.4, sin embargo en el sistema formador de imágenes, son utilizadas dos matrices de multi-lentes para lograr una mejor uniformidad del haz. En la figura 4.17 se muestra el arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.

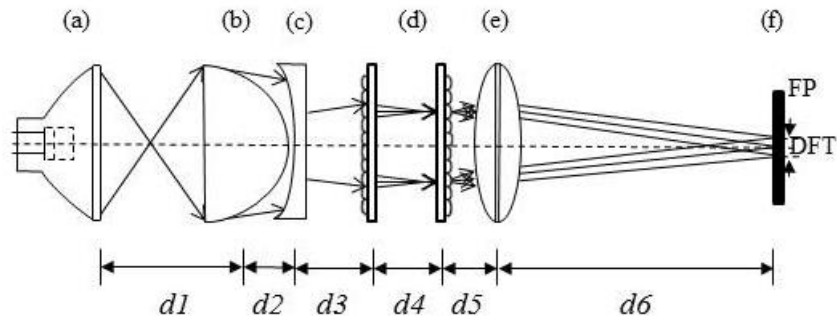


Figura 4.17. Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS, (a) lámpara de luz, (b) lente condensadora, (c) lente divergente, (d) doble matriz de multi-lentes, (e) lente de campo, (f) detector.

4.6.1 Parámetros de simulación para el arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes

Los parámetros de simulación para el arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS, corresponden a los mismos que integran al arreglo óptico con una matriz de multi-lentes presentado en la sección 4.4.1, contando el par de matrices de multi-lentes, con las mismas características.

En la tabla 4.5 se muestran las distancias de separación utilizadas en el arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.

Tabla 4.5 Distancias de separación entre elementos en el arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.

	<i>d1</i> (mm)	<i>d2</i> (mm)	<i>d3</i> (mm)	<i>d4</i> (mm)	<i>d5</i> (mm)	<i>d6</i> (mm)
Arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes	44	6	26.5	39	19	150

4.6.2 Trazo de rayos

En la figura 4.18 se muestra el trazo de rayos del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes propuesto para FILSS obtenido de la plataforma ZemaxTM, con un número de 150 rayos simulados.

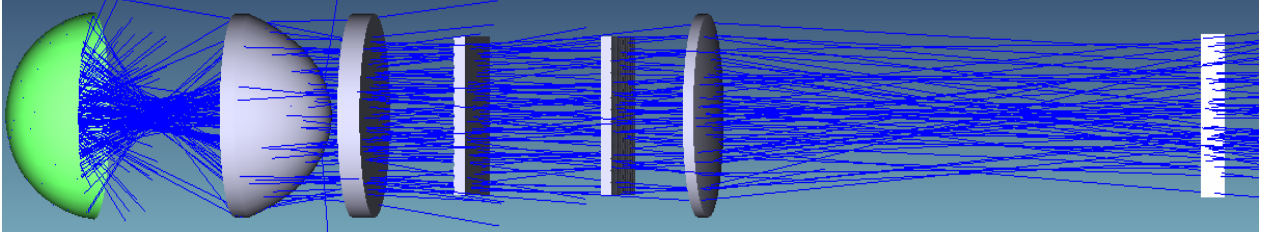


Figura 4.18. Trazo de rayos del arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS generado en el simulador ZemaxTM.

4.6.3 Resultados de las simulaciones

En la figura 4.19 se muestra la mancha de luz obtenida en el detector, a la salida del arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS basada en un sistema formador de imágenes. En esta figura se puede observar una mejor intensidad uniforme en el centro de la imagen, con forma rectangular, que en resto de los arreglos ópticos propuestos para FILSS. Ésto es debido a que el par de matrices de multi-lentes generan una superposición de los haces de luz, creando una distribución uniforme (flat top o de superficie plana).

El tamaño de la mancha de luz calculada D_{FT} es obtenido en el eje vertical y horizontal a partir de la ecuación (3.16), quedando para el eje vertical como en (4.12):

$$D_{FT} = 3mm \frac{150mm}{38.1mm \cdot 38.1mm} [(38.1mm + 38.1mm) - 39mm] = 11.53mm \quad (4.12)$$

Y para el eje horizontal como en (4.13):

$$D_{FT} = 4mm \frac{150mm}{38.1mm \cdot 38.1mm} [(38.1mm + 38.1mm) - 39mm] = 15.37mm \quad (4.13)$$

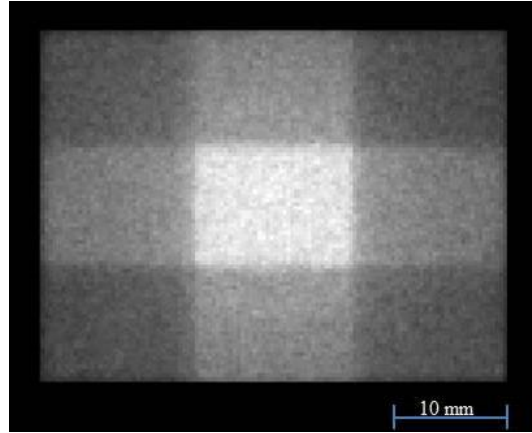


Figura 4.19. Mancha de luz obtenida a la salida del arreglo óptico con doble matriz de multi-lentes propuesto para FILSS.

El tamaño estimado de la mancha de luz D_{FT} obtenida de la simulación en ZemaxTM es de 15.37mm x 11.53mm el cual concuerda con los valores calculados en (4.12) y (4.13).

Capítulo 5

Experimentos y resultados.

5.1 Desarrollo experimental.

En capítulos anteriores, fueron definidos los conceptos fundamentales de óptica, así como presentados y simulados cada uno de los arreglos ópticos propuestos como prototipos soldadores para FILSS, donde la distribución espacial de luz o irradiancia y el tamaño de la mancha de luz son obtenidos en cada uno de los arreglos ópticos. En este capítulo, se presentan los arreglos experimentales de cada uno de los arreglos ópticos propuestos para FILSS, así como los resultados de distribución de luz, distribución de temperatura y un análisis de transferencia de calor obtenidos en cada uno de estos arreglos ópticos.

Los elementos ópticos que tuvieron un mejor desempeño en las simulaciones presentadas en el capítulo 4 fueron seleccionados para realizar la experimentación de los arreglos ópticos propuestos para FILSS, los cuales son mostrados en la tabla 5.1. Los elementos ópticos utilizados, dependen del arreglo óptico en que se esté desarrollando la experimentación.

Tabla 5.1. Elementos ópticos utilizados en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Elemento	Modelo	Proveedor
Lámpara QTH, con reflector elíptico de oro	HLX 64635, 150W, 15V	OSRAM
Lente esférica, UV SiO₂, FL=40mm	M-67-266, sin película AR	Edmund Optics
Difusor, UV SiO₂	M49-237	Edmund Optics
Lente divergente, UV SiO₂, FL=-250	M08-074, sin película AR	Edmund Optics
Matriz de multi-lentes, vidrio B270	M63-230	Edmund Optics
Lente biconvexa, UV SiO₂, FL=150mm	M32-982, sin película AR	Edmund Optics

Todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS fueron montados sobre una mesa óptica. Fue necesario contar con un riel de 90 centímetros de largo, sobre el cual fueron colocados desde 4 hasta 7 soportes mecánicos, dependiendo del arreglo, con la finalidad de facilitar el traslado de los elementos ópticos. Asimismo, fueron utilizados el mismo número de porta-vástagos, vástagos y porta-lentes, colocados en cada uno de los soportes mecánicos.

A continuación en la figura 5.1 a la figura 5.4 son presentadas las fotografías tomadas de cada uno de los arreglos experimentales propuestos para FILSS y el elemento BGA que se desea re-trabajar.



Figura 5.1. Fotografía del arreglo básico para FILSS.

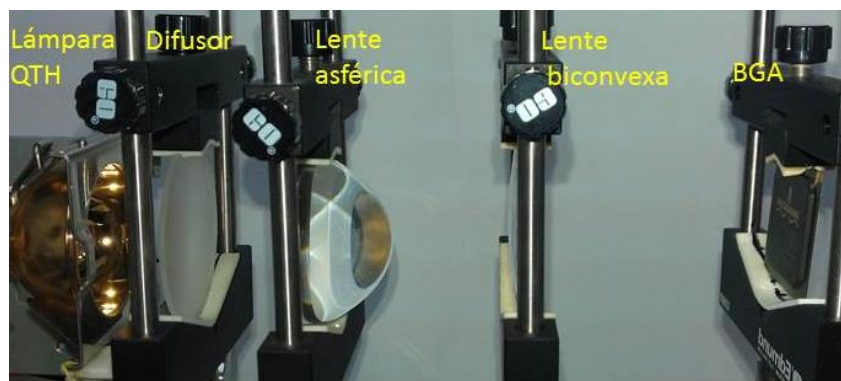


Figura 5.2. Fotografía del arreglo con difusor de vidrio esmerilado para FILSS.



Figura 5.3. Fotografía del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes para FILSS.

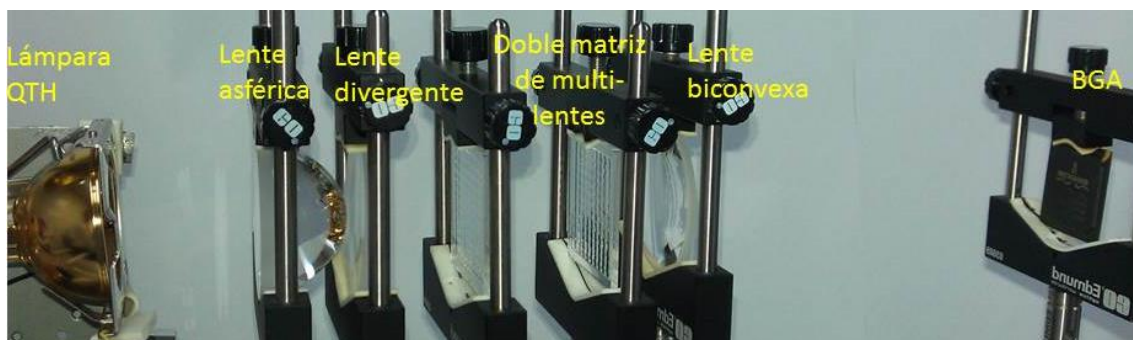


Figura 5.4. Fotografía del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes para FILSS.

El espectro de emisión de la lámpara QTH utilizada como fuente de luz en los arreglos ópticos para FILSS emite longitudes de onda que van desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR), por lo que fue necesario contar con medidas de seguridad en el desarrollo de los experimentos, como los son gafas protectoras, careta protectora de UV, bata y guantes, así como el realizarse los experimentos en un cuarto cerrado y oscuro.

A continuación son explicados los arreglos experimentales utilizados en los arreglos ópticos para FILSS y posteriormente los resultados obtenidos de estos experimentos.

5.1.1 Arreglo experimental para obtención de distribución de luz

El primer experimento realizado en cada uno de los arreglos ópticos propuestos para FILSS, fue construido con la finalidad de obtener la distribución de luz o irradiancia. Para esto, fue utilizada una cámara CCD a la salida de cada uno de los arreglos ópticos propuestos para FILSS. Las características de la cámara CCD utilizada para la obtención de la mancha de luz a la salida de los arreglos ópticos propuestos para FILSS son mostradas en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Características de cámara CCD para captura de la mancha de luz.

Modelo	VCCG20V30
Imagen	Escaneo de Área, monocromático
Tamaño de la imagen	6.3 mm (H) x 4.8 mm (V), 113 inch
Matriz de la imagen	644 (H) x 494 (V) pixels
Tamaño del pixel	7.4 μm (H) x 7.4 μm (V), pixeles cuadrados

Para la obtención de las manchas de luz emitidas por cada arreglo óptico propuesto para FILSS, una pantalla fue colocada a la distancia de operación del arreglo óptico utilizado (distancia a la cual se encontraría el componente BGA que se desea re-trabajar). En la figura 5.5 se muestra el diagrama a bloques del arreglo experimental utilizado para la obtención de la distribución de luz en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

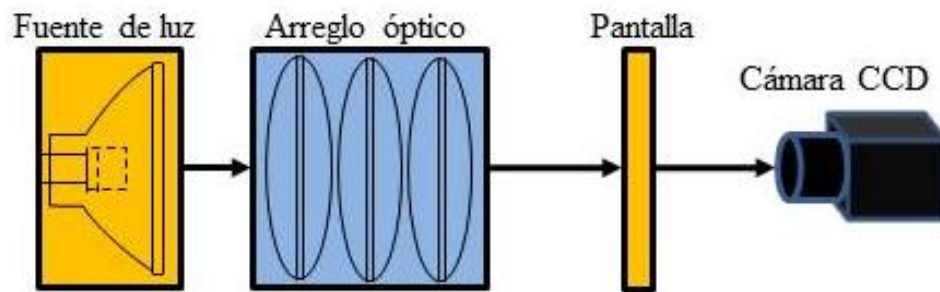


Figura 5.5. Diagrama a bloques del arreglo experimental para obtención de distribución de luz.

Un parámetro importante definido en la cámara CCD utilizada para capturar la distribución de luz de los arreglos ópticos para FILSS, fue el tiempo de exposición, el cual permite variar la calidad de la mancha de luz capturada. El tiempo de exposición en esta cámara CCD se encontraba desactivado, por lo que para la captura de la mancha de luz en los arreglos ópticos propuestos para FILSS se utilizó un tiempo de exposición entre 1ms y 3ms,

tiempo seleccionado al proporcionar mejor calidad de la imagen experimentalmente dependiendo del arreglo óptico utilizado.

Estos arreglos experimentales fueron desarrollados en un valor mínimo de operación de la lámpara QTH de 3V @1A, con la finalidad de obtener la distribución de luz con la menor cantidad de radiación infrarroja que proporciona la lámpara evitando saturación y daño a la cámara CCD.

Un arreglo de lentes modelo Navitar Zoom 7000 fue utilizada en la cámara CCD, para la captura de las manchas de luz. Este arreglo de lentes cuenta con enfoque manual.

5.1.2 Arreglo experimental para obtención de distribución de temperatura

En el arreglo experimental utilizado para la obtención de distribución de temperatura en los arreglos ópticos propuestos para FILLS, fue utilizada una cámara termográfica modelo ThermoCAM E25 del proveedor FlirTM. Por medio de este instrumento de medición se miden las temperaturas sobre la cara anterior y posterior del componente BGA que se desea re-trabajar. En la tabla 5.3 se muestran las características de la cámara termográfica ThermoCAM E25.

Tabla 5.3. Características de la cámara termo-gráfica ThermoCAM E25.

Tipo de detector	Arreglo del plano focal (FPA), 160 x 120 pixeles
Rango espectral	7.5-13 μm
Presentación de la imagen	LCD a color de 2.5", colores de 16 bits
Salida de video	Composite video CVBS
Rango de temperatura	Puede ser seleccionado por el usuario.
Láser	Diodo laser semiconductor AlGaInP, Clase 2

Los parámetros de configuración que deben ser definidos en la cámara termo-gráfica para obtener una correcta medición de la distribución de temperatura en el dispositivo BGA que se desea re-trabajar, se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Parámetros de configuración definidos en la cámara termo-gráfica ThermaCAM E25.

Enfoque	Automático
Emisividad	0.98 (Valor calibrado con termopares)
Paleta de colores	Arco iris
Rango de temperatura	0 - 250°C

El componente BGA fue colocado a la distancia de operación del arreglo óptico propuesto, al igual que cuando es obtenida la distribución de luz, con la finalidad de obtener la distribución temperatura medida por la cámara termo-gráfica en el componente BGA. En la figura 5.6 se muestra el diagrama a bloques del arreglo experimental utilizado para la obtención de distribución temperatura en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

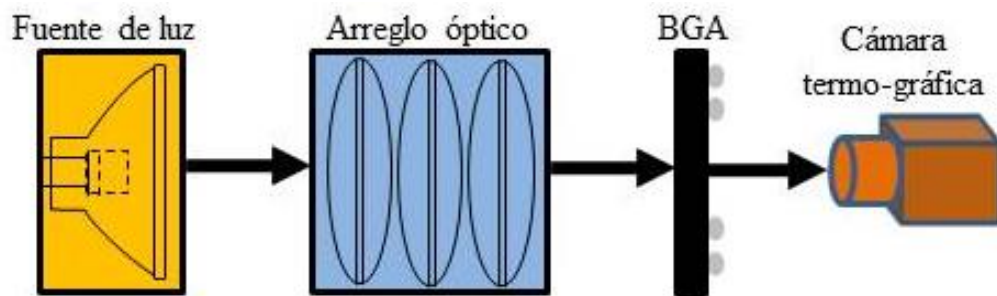


Figura 5.6. Diagrama a bloques del arreglo experimental para obtención de distribución temperatura.

El software ThermaCAMTM QuickView fue utilizado para obtener las imágenes capturadas por la cámara termo-gráfica, en donde fue realizado el análisis de distribución

temperatura. En este software se encuentra una herramienta llamada puntero móvil, el cual fue utilizado para leer la información de temperatura, en cualquier punto de la imagen, de tal manera que se puede conocer la distribución temperatura, por medio de la lectura de una matriz de temperaturas, sobre el dispositivo BGA de donde fue capturada la imagen termo-gráfica.

Para contar con un respaldo de cada uno de los experimentos realizados con los arreglos ópticos propuestos para FILSS, fue realizada una grabación de video, en donde se tiene registradas las diferencias de temperaturas logradas en el componente BGA.

5.1.3 Arreglo experimental para obtención de transferencia de calor

En el arreglo experimental utilizado para la obtención de la transferencia de calor, fueron utilizados dos instrumentos de medición de temperatura. Uno de ellos fue la cámara termo-gráfica ThermoCAM E25, la cual fue explicada en el arreglo experimental para obtención de distribución de calor. El segundo instrumento de medición utilizado para la obtención de transferencia de calor fue un termómetro de 4 canales con termopares tipo K, y el cual a su vez también fue utilizado para la obtención del perfil de temperatura por reflujo en los arreglos ópticos propuestos para FILSS. En la tabla 5.4 se muestran las características del termómetro de 4 canales utilizado en este arreglo experimental.

Tabla 5.5. Características del termómetro de 4 canales utilizado para medir la transferencia de calor.

Modelo	HH309A
Rango	-200 - 1370°C
Tasa de muestreo	3 segundos
Resolución	0.1° entre -200° y 200°C
Termopar	Tipo K

Los modos de transferencia de calor que fueron analizados con estos instrumentos de medición, son la transferencia de calor por radiación en el arreglo óptico propuesto para FILSS y la transferencia de calor por conducción en el componente BGA.

A continuación se explican los métodos utilizados para el análisis de la transferencia de calor en el arreglo óptico y en el componente BGA.

5.1.3.1 Arreglo óptico

El análisis de transferencia de calor por radiación en los arreglos ópticos propuesto para FILSS se basan en el método de reflujo por infrarrojo, presentado en la ecuación (2.1), donde están involucrados varios parámetros, como los son el factor de forma del arreglo óptico, el cual es la proporción de radiación la cual sale de la fuente de luz y llega al componente BGA; la emisividad de la fuente de luz, la absorción del componente BGA, la constante de Stefan-Boltzman y la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia entre la fuente de luz y el componente BGA.

Por lo que para obtener la transferencia de calor por radiación, es necesario conocer las temperaturas alcanzadas en la lámpara de luz y en el componente BGA. La temperatura en el componente BGA es medida en la cara anterior del BGA en donde incide luz, utilizando la cámara termo-gráfica y termopares. La temperatura que alcanza la lámpara en el filamento emisor de luz no puede ser medida, ya que sobrepasa los rangos de temperatura que soportan los instrumentos de medición utilizados en los arreglos experimentales para FILSS. Sin embargo, como la fuente de luz es una lámpara incandescente, como se comentó en el capítulo 3, esta puede ser considerada un cuerpo gris, el cual puede emitir a una temperatura de 3500 K, con una emisividad de 0.35, siendo estos los datos considerados para su análisis [32].

5.1.3.2 BGA

El análisis de transferencia de calor por conducción en el componente BGA, se rige por la ecuación (2.2), en donde la conductividad térmica del material, el área de sección transversal, la diferencia de temperatura entre el lado en donde incide luz (cara anterior) y el lado a donde es transferida la energía (cara posterior) y el grosor del material, conforman

sus parámetros principales. En este análisis fue necesario medir las temperaturas alcanzadas, en ambas caras del componente BGA, utilizando la cámara termo-gráfica y termopares. La colocación de los termopares fue al centro, con respecto a su eje óptico y en ambos lados del componente BGA, como se muestra en la figura 5.7.

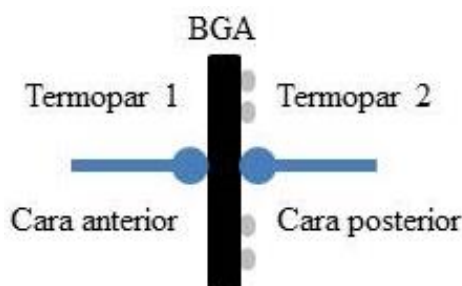


Figura 5.7. Colocación de los termopares en el componente BGA para medición de temperaturas.

5.2 Resultados

Los resultados obtenidos de los experimentos con los arreglos ópticos propuestos para FILSS fueron analizados y divididos en tres secciones:

- 1) Distribución de luz.
- 2) Distribución de temperatura.
- 3) Transferencia de calor.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada sección.

5.2.1 Distribución de luz

Las manchas de luz a la salida de cada uno de los arreglos ópticos propuestos para FILSS fueron capturadas experimentalmente en una cámara CCD, con la finalidad de conocer la distribución de luz que presenta cada uno de estos arreglos.

En la figura 5.8 se muestra la mancha de luz obtenida del arreglo básico propuesto para FILSS, en donde se puede observar la forma del filamento, similar a la mancha de luz obtenida en simulación. El tamaño de esta mancha de luz abarca aproximadamente un

diámetro de 35mm, sin embargo, la mayor intensidad de luz se presenta en un diámetro aproximadamente de 20mm.

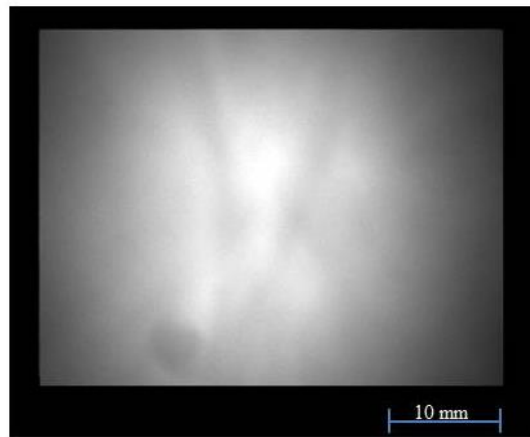


Figura 5.8. Mancha de luz obtenida del arreglo básico para FILSS.

El software ImageJ (programa de dominio público de procesamiento de imágenes) fue utilizado para analizar la distribución de las manchas de luz de los arreglos ópticos para FILSS. Una vez que los datos fueron obtenidos en este programa, el software MatLabTM fue utilizado para graficar las distribuciones de las manchas de luz de los arreglos ópticos. En la figura 5.9 se muestra la distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo básico para FILSS. En esta figura se puede observar las variaciones o relieves en las intensidades de luz máximo, teniendo una no uniformidad de la mancha de luz obtenida en el arreglo básico propuesto para FILSS.

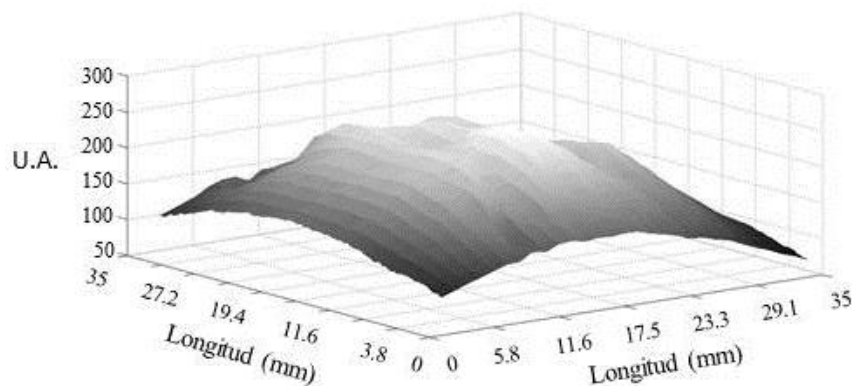


Figura 5.9. Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo básico graficada en Matlab.

En la figura 5.10 se muestra la mancha de luz obtenida del arreglo con difusor de vidrio esmerilado para FILSS, en donde se puede observar que el elemento difusor desvaneció la forma del filamento de la mancha de luz proveniente de la fuente de luz. El tamaño de la mancha de luz en este arreglo óptico es aproximadamente de 20mm de diámetro.

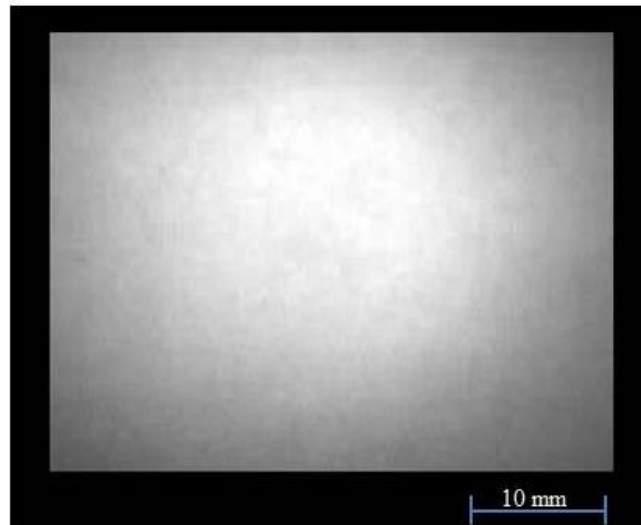


Figura 5.10. Mancha de luz capturada en la cámara CCD del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado para FILSS.

La distribución de la mancha de luz para el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado se muestra en la figura 5.11. En esta figura se observa que los relieves se atenúan en las máximas intensidades de luz, teniendo una irradiancia uniforme en un área aproximada de 20mm.

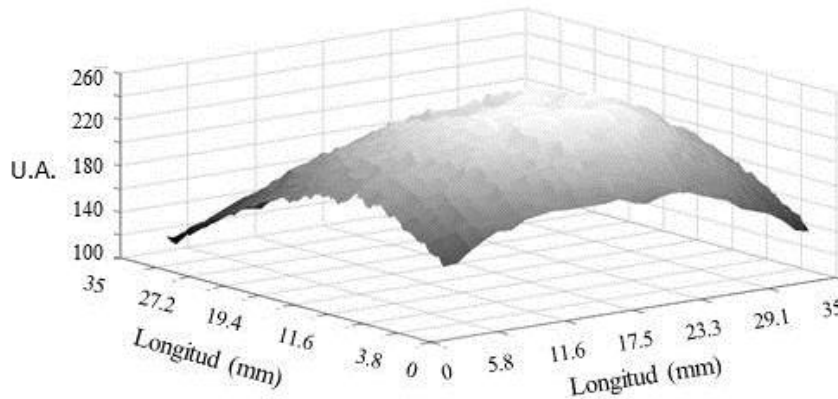


Figura 5.11. Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado graficada en Matlab.

La mancha de luz obtenida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes para FILSS es mostrada en la figura 5.12, donde la distribución espacial y las dimensiones son muy similares a las obtenidas en la simulación y con un tamaño de mancha de acuerdo a las ecuaciones (4.10) y (4.11).

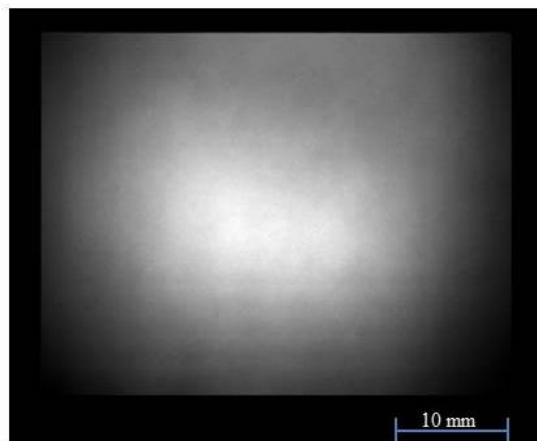


Figura 5.12. Mancha de luz capturada en la cámara CCD del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes para FILSS.

En la figura 5.13 se muestra la distribución de luz para el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes para FILSS. En esta figura se observa una irradiancia uniforme con un tamaño de mancha de luz aproximadamente de 11.81mm x 15.74 mm, valores que concuerdan con la teoría y las simulaciones mencionadas anteriormente.

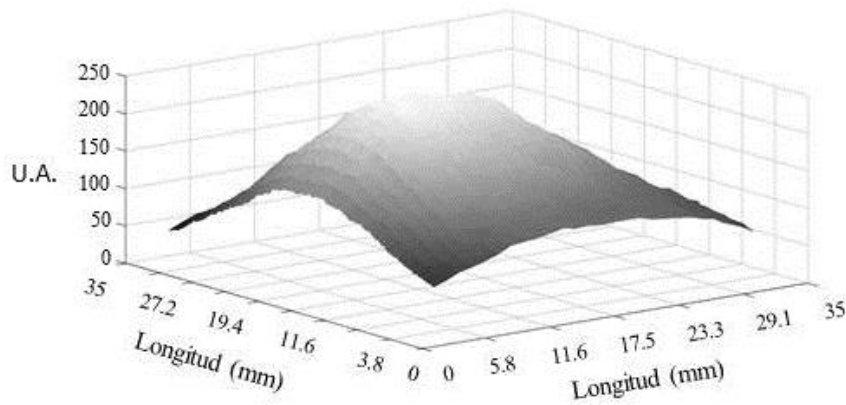


Figura 5.13. Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes graficada en Matlab.

La mancha de luz obtenida del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes para FILSS se muestra en la figura 5.14, en donde se puede observar una forma rectangular con mayor intensidad de 15.37mm x 11.53mm, al centro de la imagen. Este tamaño y forma de la mancha de luz concuerdan con los valores calculados y simulados con anterioridad.

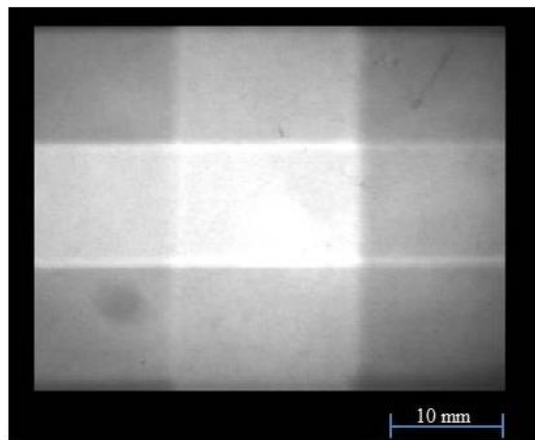


Figura 5.14. Mancha de luz capturada en la cámara CCD del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes para FILSS.

La distribución de la mancha de luz resultante del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes se muestra en la figura 5.15, en donde se observa una alta uniformidad en la

distribución de luz (superficie plana o flat top) en el área calculada en las ecuaciones (4.12) y (4.13).

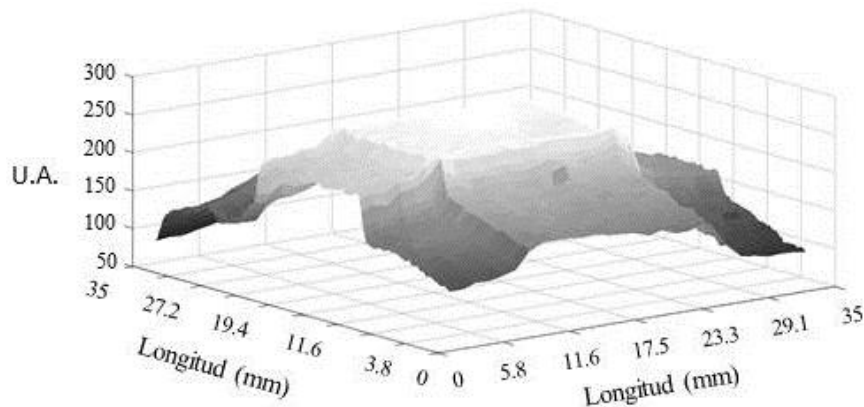


Figura 5.15. Distribución de la mancha de luz obtenida del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes graficada en Matlab.

5.2.2 Distribución de temperatura

Para conocer la distribución de temperatura que se produce a la salida de cada arreglo óptico propuesto para FILSS, se realizaron mediciones de temperatura con una cámara termo-gráfica sobre la superficie de un componente BGA de 35 x 35mm. Para esto fue seguido el perfil de reflujo de temperatura para soldar componentes BGA libre de plomo, con la finalidad de asegurar que el proceso de soldadura sea ejecutado sin que sufra daños el componente BGA, así como el que se logre una completa soldadura del componente. Este perfil de reflujo de temperatura fue ejecutado mientras se desarrollaba la experimentación y medido con termopares sobre la superficie del BGA, el cual es mostrado en la figura 5.16. En esta figura se observan 4 perfiles de temperatura T1-T4, los cuales corresponden a las temperaturas alcanzadas en cuatro termopares ubicados en forma diagonal de un extremo al centro del componente BGA, donde T1, la temperatura más baja, es la temperatura medida en el termopar ubicado en un extremo del BGA, mientras que T4, la cual es la temperatura más elevada, es la temperatura medida en el termopar ubicado en el centro del BGA.

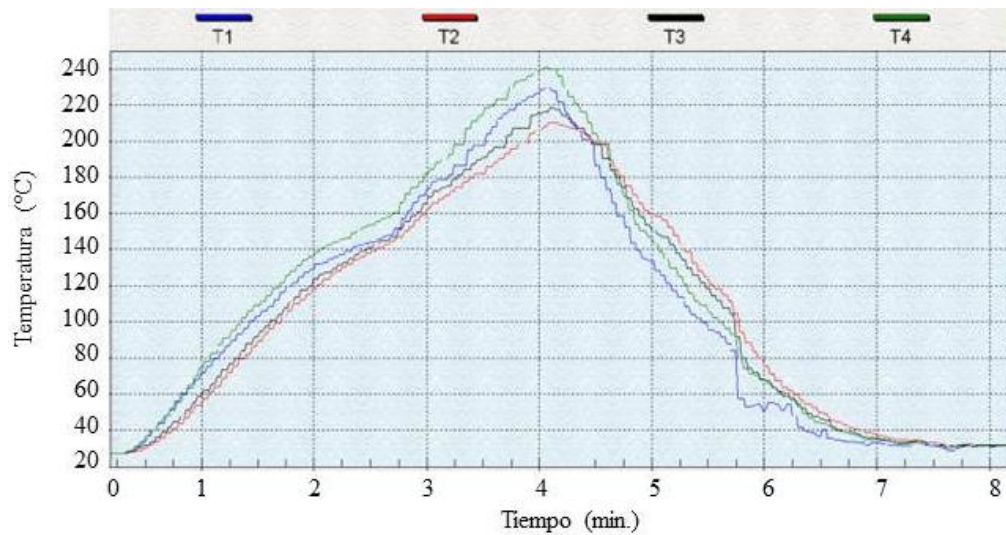


Figura 5.16. Perfil de temperatura por reflujo utilizado en el arreglo básico propuesto para FILSS.

Una vez que fueron capturadas las imágenes termo-gráficas sobre la superficie del componente BGA con la cámara termo-gráfica, fue medido el pico de temperatura alcanzado en la etapa de reflujo en el componente, utilizando el puntero móvil del software ThermoCAMTM QuickView, analizando la distribución de temperatura de cada uno de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

En la figura 5.17 se muestra la imagen termo-gráfica capturada en el BGA del arreglo básico con ThermoCAMTM, en donde se tiene un pico de temperatura de 241.2°C lograda al centro del componente. Este pico de temperatura es suficiente para fundir soldadura libre de plomo (~232°C para la aleación de Sn-Ag-Cu, comúnmente usada), el cual es uno de los principales parámetros que se desean obtener de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

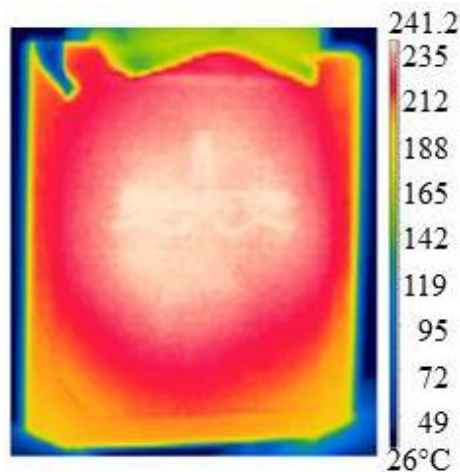


Figura 5.17. Imagen termo-grafica capturada en el arreglo básico con ThermaCAMTM.

Otro parámetro importante que se desea obtener es la distribución de temperatura uniforme en un área determinada de trabajo. Por tal motivo, las distribuciones de temperaturas de cada una de las imágenes de temperaturas capturadas, fueron analizadas utilizando el software MatlabTM como plataforma de comprobación.

En la figura 5.18 se muestra la distribución de temperatura obtenida en la superficie del componente BGA a la salida del arreglo básico para FILSS, graficada en el software MatlabTM. En esta figura se muestra una variación en los valores de temperatura logrados, debido a la no uniformidad a la salida en este arreglo óptico sobre el área que se desea soldar, asemejándose esta no uniformidad a la distribución de luz de la figura 5.9 del mismo arreglo básico. El área donde se observa el mayor incremento de temperatura en la figura 5.18 es un diámetro de aproximadamente de 25mm.

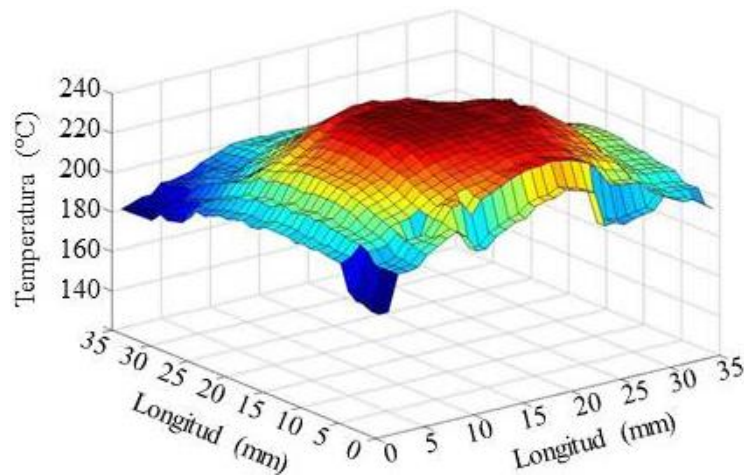


Figura 5.18. Distribución de temperatura del arreglo básico.

La figura 5.19 muestra la imagen termo-gráfica capturada a la salida del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado. En esta imagen una temperatura un pico de temperatura de 205.4°C es lograda al centro del componente BGA.

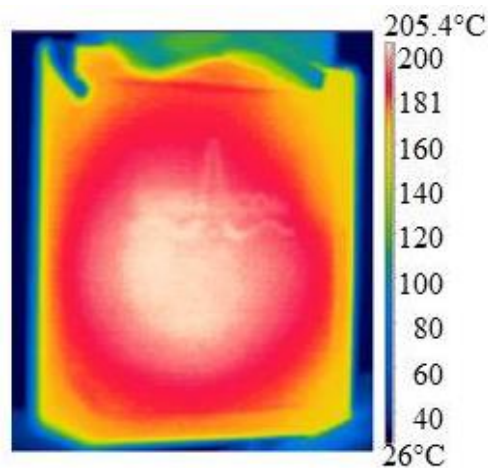


Figura 5.19. Imagen termo-gráfica capturada en el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado con ThermaCAMTM.

En la figura 5.20 se muestra la Distribución de temperatura obtenida en el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado. En esta figura se puede observar una distribución de temperatura uniforme en un área de aproximadamente 25 mm de diámetro, área en la que se tiene la mayor temperatura lograda por este arreglo óptico.

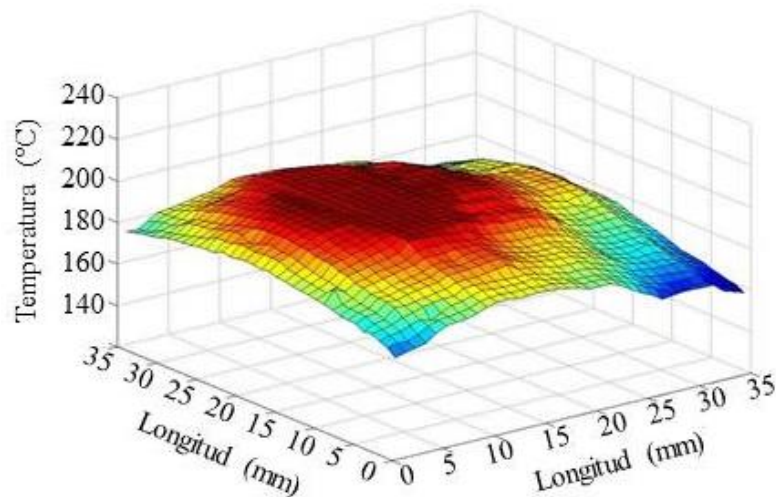


Figura 5.20. Distribución de temperatura del arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado.

La figura 5.21 muestra la imagen termo-gráfica capturada en un componente BGA a la salida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes. El pico de temperatura máximo logrado en este arreglo fue de 200.3°C al centro del componente.

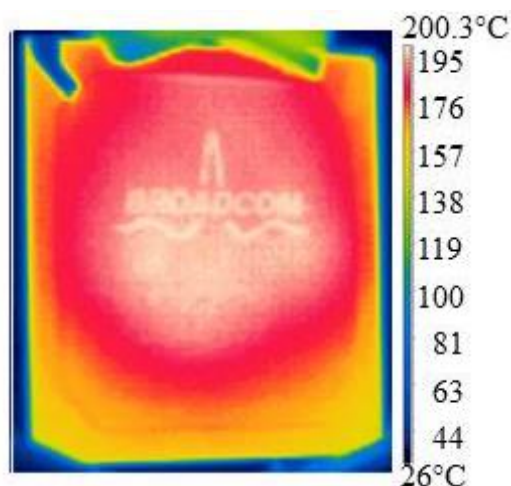


Figura 5.21. Imagen termo-grafica capturada en el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes con ThermoCAMTM.

En la figura 5.22 se muestra la Distribución de temperaturalograda a la salida del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes, donde se observa una distribución uniforme en un área de aproximadamente 25 mm de diámetro, siendo esta el área con mayor temperatura lograda.

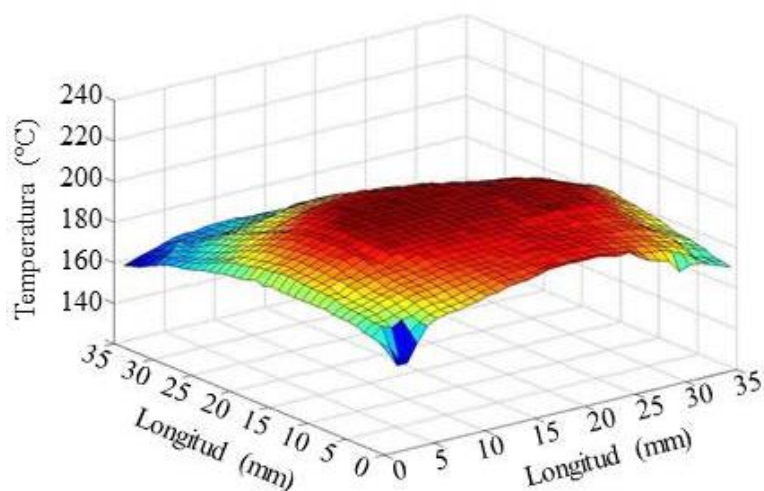


Figura 5.22. Distribución de temperatura del arreglo óptico con una matriz de multi-lentes.

La última imagen termo-gráfica capturada con ThermaCAMTM, fue la correspondiente a la temperatura en el componente BGA ubicado a la salida del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes. Esta imagen es mostrada en la figura 5.23, donde un pico de temperatura de 176.2°C es logrado en el centro del componente.

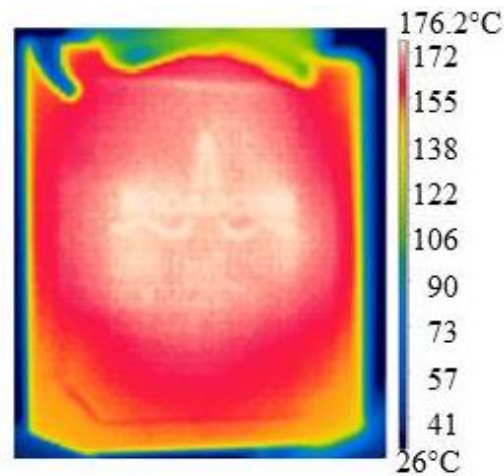


Figura 5.23. Imagen termo-gráfica capturada en el arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes con ThermaCAMTM.

La figura 5.24 muestra la distribución temperatura obtenida en el BGA a la salida del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes. La distribución de temperatura lograda en éste arreglo óptico, es la que mejor uniformidad de temperatura muestra en la misma área de 25 mm de diámetro en los arreglos ópticos propuestos para FILSS. Aunque la distribución de luz que muestra este arreglo óptico en la figura 5.15 no se asemeja a la distribución de temperatura se observa que la uniformidad en el área, ya sea de luz y de calor, es mejor que en el resto de los arreglos ópticos propuestos para FILSS. El incremento en el área que abarca la distribución uniforme temperatura en la figura 5.24, en comparación con el área con distribución uniforme de luz, puede deberse a la difusión de calor que sucede en el material del componente BGA.

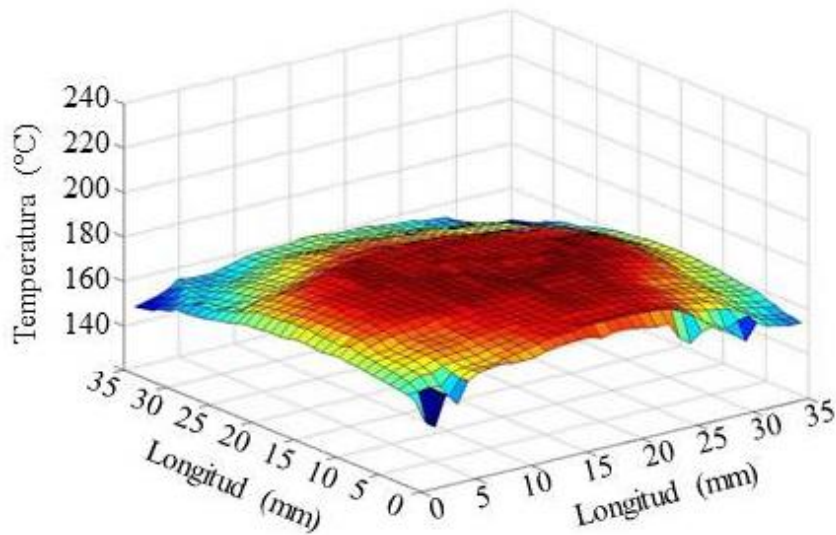


Figura 5.24. Distribución de temperatura del arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes.

En éste arreglo óptico, al igual que en los otros dos arreglos ópticos anteriores, el arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado y el arreglo óptico con una matriz de multi-lentes, en donde fueron añadidos elementos ópticos, la temperatura alcanzada no es suficiente para lograr fundir la soldadura libre de plomo. Sin embargo, un elemento calefactor el cual es utilizado en la parte inferior del componente BGA en la máquina de retrabajo, puede contribuir con una temperatura adicional $\Delta T \sim 40-60^{\circ}\text{C}$ [1-2,17,], ayudando a lograr el rango de temperaturas mínimas requeridas en el proceso de soldadura libre de plomo.

Una mayor o menor área con distribución uniforme de calor puede ser obtenida en los arreglos ópticos para FILSS, variando las distancias de los elementos ópticos, distancias focales y diámetros.

La variación de temperatura permitida en el proceso de soldadura libre de plomo, es de 10°C , rango de temperatura en el cual todos los arreglos ópticos propuestos para FILSS se encuentran, como se muestra en la tabla 5.6. En la tabla 5.6 se muestra un análisis

estadístico de temperaturas promedio y desviaciones estándar obtenidas de las imágenes termo-gráficas de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Tabla 5.6. Análisis estadístico de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Arreglo óptico propuesto para FILSS	Pico de temperatura (°C)	Temperatura promedio (°C)	Desviación estándar de temperatura (°C)
Arreglo Básico	241.2	225.2	8.4
Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado	205.4	192.9	3.72
Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes	200.3	189.8	2.4
Arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes	176.2	167.4	2

En esta tabla se observa que el arreglo óptico con mayor variación de temperatura es el arreglo básico, con una desviación estándar de 8.4°C, siendo este mismo arreglo óptico, el que muestra el mayor pico de temperatura alcanzada de 241.2°C. Sin embargo, el arreglo óptico con una mejor distribución uniforme de temperatura es el arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes, el cual muestra un pico de temperatura de 176.2°C, con una desviación estándar de 2°C. Estos dos parámetros, mayor temperatura y distribución uniforme de temperatura, son las principales características con las cuales debe de contar el arreglo óptico propuesto para FILSS. Con la finalidad de lograr un mejor desempeño de los arreglos ópticos propuestos para FILSS y cumplir con estas dos principales características, fue realizado un análisis de los parámetros que influyen en el desempeño de los elementos ópticos utilizados en la experimentación. En éste análisis fueron encontrados tres

parámetros que afectan en el desempeño de los arreglos ópticos para FILSS: la absorción en el cristal, la reflexión de Fresnel y pérdidas por el guiado de luz.

El primer parámetro analizado fue la absorción en los elementos ópticos utilizados para FILSS. Fue encontrado que en los elementos ópticos fabricados en material de SiO₂ grado UV, se tiene un 99.99% de transmisión interna (Γ_i), siendo solo el 0.01% la absorción en el material. Los elementos ópticos fabricados en material B270, tiene un 99.97% de transmisión interna (Γ_i), siendo la absorción en este material del 0.03%.

El segundo parámetro analizado fue la reflexión de Fresnel o factor de reflexión. Aplicando la ecuación (3.20) cuando se tiene la interface de aire-cuarzo fundido, con índice de refracción $n_o=1.000293$; con el elemento óptico de material de SiO₂ grado UV con índice de refracción $n_f= 1.47$, obtenemos el resultado de las pérdidas por reflexión en cada una de las caras en el elemento óptico en (5.1):

$$\sigma_{SiO_2} = \left(\frac{1.00-1.47}{1.00+1.47} \right)^2 = 0.036 \approx 0.04 \quad (5.1)$$

Utilizando esta misma ecuación para obtener las pérdidas por reflexión en los elementos ópticos en los que es utilizado el material B270 con índice de refracción $n_f= 1.523$, obtenemos el resultado en (5.2) para cada cara del elemento óptico:

$$\sigma_{B270} = \left(\frac{1.00-1.52}{1.00+1.52} \right)^2 = 0.042 \approx 0.04 \quad (5.2)$$

Para conocer la pérdida total debido a la reflexión de Fresnel o factor de reflexión es utilizado el complemento de las pérdidas por reflexión, es decir, la transmitancia en cada una de las interfaces de los elementos ópticos utilizados en los arreglos ópticos para FILSS. Como se mencionó en la ecuación (3.22), la transmitancia para SiO₂ grado UV y para B270 queda como en la ecuación (5.3):

$$\Gamma = 1 - 0.04 = 0.96 \quad (5.3)$$

Utilizando la ecuación (3.23) se puede obtener la transmitancia total en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, y por ende pueden ser obtenidas las pérdidas por reflexión. En la tabla 5.7 se muestran los resultados de transmitancia total y pérdidas por reflexión calculadas para los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Tabla 5.7. Transmitancia total y pérdidas por reflexión obtenidas de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Arreglo óptico propuesto para FILSS	Transmitancia	Porcentaje de transmitancia (%)	Porcentaje de pérdidas por reflexión (%)
Arreglo Básico	0.8493	≈85	15
Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado	0.7828	≈78	22
Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes	0.7214	≈72	28
Arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes	0.6648	≈66	34

El tercer parámetro por el que se encuentran afectados los arreglos ópticos propuestos para FILSS, es la pérdida en el guiado de la luz o factor de forma. Este parámetro también se ve afectado por los anteriores dos parámetros, como lo son absorción y reflexión, ya que estas afectan a que la luz llegue correctamente a su destino. El incorrecto guiado de la luz es un parámetro que afecta en el desempeño del arreglo óptico propuesto para FILSS. Sin embargo, para solucionar esta pérdida en el guiado, la solución es variar las distancias a las cuales se encuentran los elementos ópticos, siendo esto muy dependiente de los elementos ópticos utilizados y sus características.

Después de ser analizados cada uno de los parámetros que influyen en el desempeño de los arreglos ópticos, se encontró que uno de los parámetros que afecta de mayor manera en el desempeño de estos y que puede ser modificado para un correcto funcionamiento, es la reflexión de Fresnel ($\sim 4\%$) que se presenta en cada interface aire-cristal en los elementos ópticos utilizados en los arreglos ópticos propuestos. Esta reflexión de Fresnel o factor de reflexión, se debe a que los elementos ópticos utilizados no cuentan con películas antirreflectoras (AR), por lo que fue necesario realizar un análisis del desempeño de los arreglos ópticos propuestos para FILSS, al ser agregadas películas AR para el rango de IR cercano, a los elementos ópticos.

La película antirrefleitora (AR) NIR II, abarca longitudes de onda que van de 750-1550nm, con una reflectancia promedio de 0.5 % para incidencia normal, como se muestra en la figura 5.25. Esta película AR cuenta con una baja reflectancia a las longitudes de onda en las cuales se está trabajando en los arreglos ópticos para FILSS, lo cual la hace la mejor opción para mejorar el desempeño de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

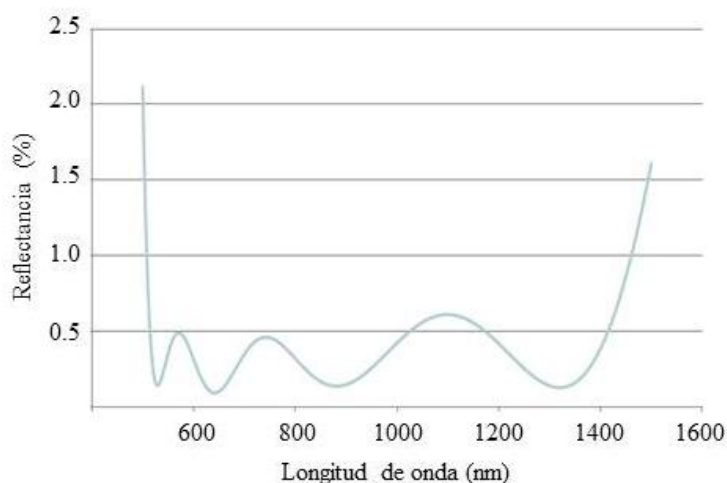


Figura 5.25. Reflexión en películas antirreflectoras NIR II [39].

Cuando son aplicadas estas películas antirreflectoras a los elementos ópticos utilizados en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, la transmitancia total en estos incrementa, dependiendo de la película anti-reflejada utilizada. En la tabla 5.8 se muestra la transmitancia total y las pérdidas por reflexión cuando es aplicada la película antirrefleitora

NIR II a cada una de las interfaces de los elementos ópticos utilizados en los arreglos propuestos para FILSS.

Por lo que se puede observar en la tabla 5.8, una reducción en el factor de reflexión en las interfaces de aire-cristal de los arreglos ópticos propuestos para FILSS. El porcentaje de reflexión obtenida cuando no son utilizadas películas antirreflectoras varía entre el 15% y el 34%, mientras que cuando son aplicadas películas antirreflectoras NIR II, se tiene una reducción en el factor de reflexión entre el 2% al 5% a un ángulo de incidencia normal [39]. Con esta reducción en el factor de reflexión, la temperatura potencial incrementa a la salida de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Tabla 5.8. Transmitancia total y las pérdidas por reflexión obtenidas de los arreglos ópticos propuestos para FILSS cuando son aplicadas películas antirreflectoras.

Arreglo óptico propuesto para FILSS	Transmitancia	Porcentaje de transmitancia (%)	Porcentaje de pérdidas por reflexión (%)
Arreglo Básico	0.9801	≈98	2
Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado	0.9704	≈97	3
Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes	0.9607	≈96	4
Arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes	0.9511	≈95	5

La temperatura obtenida a la salida de cada arreglo óptico propuesto para FILSS (T_{SMT}), puede expresarse como en (5.4):

$$T_{SMT} = (V)(T_s)(\varepsilon_s)(\Gamma_{OE})(\Gamma_i)(\alpha_{SMT}) \quad (5.4)$$

Donde V es el factor de forma del arreglo óptico, T_s es la temperatura inicial de la lámpara, ϵ_s es la emisividad de la lámpara, Γ_{OE} es la transmitancia total del arreglo óptico utilizado, Γ_i es el complemento de la absorción de los elementos ópticos utilizados y α_{SMT} es la absorción del componente SMT BGA. El factor de forma varía dependiendo del arreglo óptico propuesto para FILSS el cual puede ser definido en [46-47].

Posteriormente fueron calculadas las temperaturas a la salida de los arreglos ópticos propuestos para FILSS. De estos resultados, se observa un incremento en la temperatura alcanzada, al ser colocadas películas antirreflectoras, encontrándose estos valores de temperatura en el rango de temperatura necesaria para soldar componentes BGA con soldadura libre de plomo. En la tabla 5.9 se muestran las temperaturas alcanzadas en los arreglos ópticos para FILSS sin película antirrefleitora, así como la temperatura que se puede alcanzar con película antirrefleitora, y el potencial incremento de temperatura que se puede lograr en estos.

Tabla 5.9. Comparación de temperaturas entre los arreglos ópticos propuestos para FILSS al ser agregadas películas antirreflectoras.

Arreglo óptico propuesto para FILSS	Pico de Temperatura (°C)	Potencial pico de temperatura con película AR (°C)	Porcentaje del incremento de temperatura al colocar películas AR (%)
Arreglo óptico básico	241.2	273.7	13.5
Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado	205.4	245.4	19.5
Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes	200.3	251.2	25.4
Arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes	176.2	241.8	37.2

Se puede observar que el pico de temperatura en el arreglo óptico básico utilizando películas antirreflectoras excede la temperatura máxima requerida para soldar componentes BGA's sin que sufra daño el material del empaquetado, la cual puede variar entre 232°C y 265°C. Este hecho puede ser una ventaja para próximas aleaciones de soldadura libre de plomo con mayor temperatura para lograr el punto de fusión. Los otros tres arreglos ópticos propuestos para FILSS se encuentran en el rango permitido de temperaturas requeridas para fundir las bolas de soldadura.

5.2.3 Transferencia de calor

La transferencia de calor fue analizada en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, así como en el componente BGA en donde fueron realizados los experimentos. En la figura 5.26 se muestra la imagen del análisis de transferencia de calor por radiación y conducción dada en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

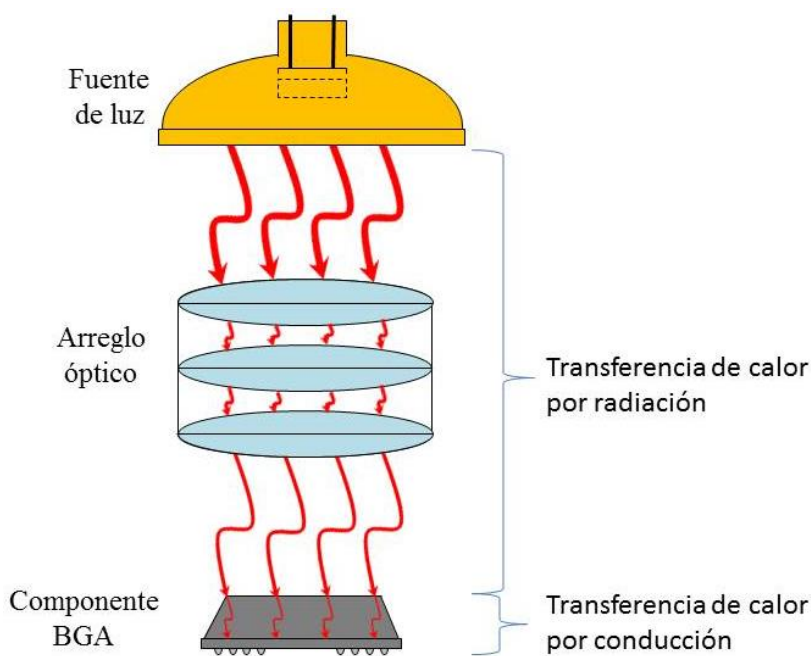


Figura 5.26. Transferencia de calor por radiación y conducción dadas en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

A continuación se presentan los análisis en el arreglo óptico y en el componente BGA.

5.2.3.1 Arreglo óptico

La transferencia de calor analizada en los arreglos ópticos propuestos para FILSS fue en el modo de radiación de infrarrojo. Para realizar éste análisis, fue necesario conocer las características de los elementos que constituyen los arreglos ópticos propuestos para FILSS, las cuales fueron analizadas en la sección 5.2.2, donde la absorción de cada uno de los elementos ópticos, la reflexión y la pérdida en el guiado son los principales parámetros que influyen en el funcionamiento del sistema. Una vez que fueron identificadas éstas características fue propuesta una ecuación que rige a estos arreglos ópticos, partiendo de la ecuación que rige a los sistemas de infrarrojo por reflujo (2.1). Así una nueva ecuación para modelar la transferencia de calor dada en los arreglos ópticos propuestos para FILSS es definida como se muestra en la ecuación (5.6):

$$Q_{IR} = V * \varepsilon_s * \Gamma_i * \Gamma_{OE} * \alpha_{SMT} * \sigma * (T_s^4 - T_{SMT}^4) \quad (5.6)$$

Donde Q_{IR} es la transferencia de calor por infrarrojo en W/cm^2 , V es el factor de forma geométrico del arreglo óptico (rango de valores entre 0 y 1), ε_s es la emisividad de la fuente de luz (rango de valores entre 0 y 1), Γ_i es la transmisión interna de los elementos ópticos (rango de valores entre 0 y 1), Γ_{OE} es el coeficiente de transmisión cumulativa en las múltiples interfaces de aire-cristal de los elementos ópticos (rango de valores entre 0 y 1), α_{SMT} es la absorción del componentes SMT (rango de valores entre 0 y 1), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-12} W/cm^2/^{\circ}K^4$) y T_s y T_{SMT} son las temperaturas de la lámpara y del componente SMT respectivamente.

Aplicando la ecuación propuesta (5.6) a los arreglos ópticos para FILSS, se puede conocer la transferencia de calor en el sistema, ya sea con o sin películas antirreflectoras. En la tabla 5.10 se muestra los valores obtenidos del análisis de transferencia de calor por radiación con y sin películas antirreflectoras en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, considerando una emisividad de la lámpara QTH $\varepsilon_s = 0.35$ [35]; una $\Gamma_i = 0.999$ para cada uno de los elementos ópticos de material de cuarzo fundido en una ventana de transmisión espectral $>250nm$ [43], para el vidrio B270 utilizado en las matrices de multi-lentes, un promedio de $\Gamma_i = 0.993$ en una ventana de transmisión entre $400nm$ y $2000nm$ [45], una

$\Gamma_{OE} = 0.92$ sin películas antirreflectoras y una $\Gamma_{OE} = 0.98$ con películas antirreflectoras a incidencia normal [39]; $\alpha_{SMT} = 0.97$ para el epóxico del BGA [48].

Tabla 5.10. Análisis de transferencia de calor por radiación para los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Arreglo óptico propuesto para FILSS	Radiación (W/cm²)	Radiación con película antirreflectora (W/cm²)
Arreglo óptico básico	52.2	59.3
Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado	38.6	46.8
Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes	37.2	47.9
Arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes	33.6	46.1

5.2.3.2 BGA

El análisis de transferencia de calor por conducción fue realizada de acuerdo a la ecuación (2.2), a un área A de un BGA de 35 x 35 mm, donde $k=0.2 \text{ W/cm}^2\text{-}^\circ\text{K}$ para el material epóxico del componente BGA [48], y una $\Delta x = 1\text{mm}$. Este análisis fue realizado con las temperaturas obtenidas en la superficie del componente BGA dadas por los arreglos ópticos propuestos para FILSS, y las temperaturas obtenidas en la parte inferior del componente.

En la tabla 5.11 se muestra los valores obtenidos del análisis de transferencia de calor por conducción en un BGA de 35 x 35 mm utilizado en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Tabla 5.11. Análisis de transferencia de calor por conducción obtenida en el BGA utilizado en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Arreglo óptico propuesto para FILSS	Conducción (W/cm²)	Conducción con película antirreflectora (W/cm²)
Arreglo óptico básico	38	46
Arreglo óptico con difusor de vidrio esmerilado	36	40
Arreglo óptico con una matriz de multi-lentes	31	40
Arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes	24.5	38

En las tablas 5.10 y 5.11 se puede observar una mayor transferencia de calor obtenida en el arreglo óptico básico con y sin película antirreflectora, en donde son utilizados la menor cantidad de elementos ópticos. En los otros tres arreglos ópticos propuestos para FILSS la transferencia de calor decrementa cuando son añadidos elementos ópticos al arreglo. Este decremento se debe a las múltiples reflexiones en las interfaces de aire-vidrio, como se comentó anteriormente, provocando una menor energía térmica que llega a la superficie del componente BGA. Sin embargo, se observa en la tabla 5.10 un incremento en la transferencia de calor por radiación cuando son aplicadas películas antirreflectoras en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, lo cual permite que estos tres últimos arreglos ópticos se encuentren dentro del rango de valores de transferencia de calor por radiación la cual se encuentra entre 44.20W y 50.49 W. Esto a su vez permite que la transferencia de calor por conducción se incremente, permitiendo fundir las uniones de soldadura en el componente BGA. Los valores de transferencia de calor por conducción para obtener una correcta soldadura debe de ser entre los 36.75 W y 61.25 W [1-2], siendo estos valores alcanzados cuando son aplicadas películas antirreflectoras. En general se puede considerar que se ha alcanzado uno de los objetivos principales de la tesis que es el diseño de un sistema de soldadura de IR. Sin embargo, se requiere de un análisis integral de

la transferencia de calor considerando una estación de trabajo de soldadura de IR con la plancha de calentamiento; además de determinar la confiabilidad y eficiencia del sistema.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

Las conclusiones obtenidas de la presente tesis son presentadas a continuación.

El proceso de cambiar la soldadura que contiene plomo a soldadura sin plomo utilizada para soldar componentes electrónicos, ha provocado que se requieran de mayores temperaturas para lograr el proceso de soldadura de los componentes SMT. Los resultados de este trabajo de tesis pueden ayudar en el desarrollo de nuevos sistemas para soldar componentes BGA's en los que sea necesario alcanzar altas temperaturas con una distribución de temperatura uniforme.

Debido a que la tendencia de los componentes electrónicos es la miniaturización, se debe de tener un mayor control en la temperatura alcanzada por los sistemas soldadores para re-trabajo, así como un mayor control en la alineación de los componentes, por lo que la técnica que ofrece estas y otras características es la basada en luz infrarroja enfocada para incidir sobre el componente tipo BGA.

Se realizó análisis teórico, simulaciones y experimentos sobre 4 arreglos ópticos propuestos como prototipos soldadores de componentes electrónicos BGA's libres de plomo, llamados FILSS (por sus siglas en inglés Focused Infrared Light Soldering System). Las principales características que fueron buscadas en estos sistemas, es el que logaran una alta temperatura con una distribución de temperatura uniforme en un área que abarca el componente tipo BGA que se desea re-trabajar.

Durante el análisis teórico de los elementos que podían constituir a los arreglos ópticos propuestos para FILSS, fueron encontrados elementos que permiten el mejorar a los

sistemas, como es el caso de la lámpara QTH y la lente esférica. La lámpara QTH tiene la característica de ser una lámpara incandescente, la cual se comporta como un cuerpo gris, logrando altas temperaturas de operación. Además, el uso de un reflector elíptico de oro utilizado en esta lámpara, incrementa un 10% su energía luminosa [42]. En el caso de la lente esférica, utilizada en estos arreglos ópticos propuestos para FILSS como lente condensadora del haz, permite disminuir o eliminar la aberración esférica producida por las lentes.

Una mejora que se observa en los arreglos ópticos propuestos para FILSS sobre el sistema original utilizado para re-trabajo [26] es el número de elementos ópticos utilizados ya que en la patente del sistema son 8 elementos ópticos los utilizados, mientras que en los arreglos ópticos propuestos para FILSS son utilizados un total de 2 a 5 elementos ópticos, sin tomar en cuenta la lámpara QTH.

La lámpara utilizada en las simulaciones de los arreglos ópticos propuestos para FILSS hecha en la plataforma ZemaxTM, así como las matrices de multi-lentes fueron diseñadas tomando en cuenta las características físicas y de funcionamiento de la lámpara QTH y las matrices de multi-lentes, respectivamente [42]. Este resultado de diseño puede servir para futuras simulaciones en la que tengan que ser utilizadas la lámpara o las matrices de multi-lentes, ya sea en una aplicación similar o diferente a las utilizadas en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

El trazo de rayos en las simulaciones de los arreglos ópticos donde fueron utilizadas matrices de multi-lentes, permitió observar que los rayos emergentes de la lente condensadora viajaban con un pequeño ángulo de convergencia, lo cual no permitía un correcto funcionamiento en las matrices de multi-lentes. Este problema fue solucionado colocando una lente divergente entre la lente condensadora y las matrices de multi-lentes, permitiendo obtener, a la salida de la lente divergente, un haz con un pequeño ángulo de divergencia y así un correcto funcionamiento de las matrices de multi-lentes.

Para obtener la distribución de luz, Distribución de temperatura y transferencia de calor, fue utilizada una metodología y una configuración de arreglos, utilizando una cámara CCD, una cámara termo-gráfica y un termómetro con termopares, respectivamente.

En los resultados de las simulaciones y en los experimentos, fueron obtenidas distribuciones espaciales de luz uniforme en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, en donde los tamaños de manchas de luz son definidos por las lentes de campo utilizadas en los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Se obtuvo un pico de temperatura de 241.2°C es medido en el arreglo óptico básico, temperatura suficiente para soldar componentes BGA's sin plomo. Por otra parte, el arreglo óptico que muestra una mejor distribución de calor, con una desviación estándar de 2°C , medida en la superficie del componente BGA, es el arreglo óptico con dos matrices de multi-lentes, mientras que el arreglo óptico básico es el arreglo óptico que muestra mayor variación, con una desviación estándar máxima de 8°C , siendo estos valores las variaciones permitidas para soldar componentes BGA's [1].

Esta distribución uniforme de calor obtenida en el BGA proveniente de los arreglos ópticos propuestos para FILSS fue medida en un diámetro aproximado de 25 mm, tamaño en el cual se encuentran los nuevos diseños de componentes electrónicos [14-15].

Se observó, que los elementos ópticos utilizados en los cuatro arreglos ópticos propuestos para FILSS, hechos de material SiO_2 o cuarzo fundido, así como de material B270, soportaron el choque térmico provocado por las altas temperaturas alcanzadas por la lámpara QTH, siendo esto de interés para el desarrollo de futuros arreglos ópticos en los que se deba de contar con resistencia al choque térmico en los elementos ópticos utilizados.

Un análisis de transferencia de calor por radiación y conducción fue aplicada a los arreglos ópticos propuestos para FILSS, el cual permite obtener información estimada de la energía de calor a la salida de los arreglos ópticos propuestos para FILSS, así como para entender el mecanismo involucrado en la transferencia de calor en el proceso de soldadura por luz infrarroja a través del arreglo óptico y el dispositivo BGA.

Este análisis permitió conocer cada uno de los parámetros que influyen en la transferencia de calor por radiación, en donde la reflexión, la absorción y las pérdidas por guiado se encuentran involucradas.

Un resultado importante obtenido de esta tesis, es la ecuación de transferencia de calor por radiación (5.6) propuesta para ser aplicada en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, así como para cualquier arreglo en donde sean aplicados elementos ópticos. En ésta ecuación son definidos cada uno de los parámetros que influyen en el guiado de luz infrarroja en el sistema, donde son utilizados elementos ópticos.

Uno de los parámetros que mayores pérdidas provoca en el sistema y en el que se puede tener control, es la reflexión producida por las lentes. Con la finalidad de lograr mayores temperaturas alcanzadas en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, fue analizado el uso de películas antirreflectoras en los elementos ópticos. El resultado de este análisis fue un incremento considerable en la temperatura alcanzada en los arreglos ópticos propuestos para FILSS, logrando así, las temperaturas requeridas para soldar.

Trabajo a futuro

El trabajo a futuro que se ha identificado durante el desarrollo de esta tesis es presentado a continuación:

- Medir la potencia óptica a la salida de los arreglos ópticos propuestos para FILSS. Analizar y comparar estas mediciones de potencia óptica con las mediciones de temperatura obtenidas en el desarrollo de la presente tesis.
- Depositar películas antirreflectoras a los elementos utilizados en los sistemas ópticos propuestos para FILSS. Posteriormente realizar una evaluación de temperatura y potencia óptica obtenida a la salida de los arreglos comparada con los resultados obtenidos de la presente tesis.
- Realizar un análisis de factor de forma entre elementos ópticos consecutivos que se encuentran involucrados en el guiado de luz de los arreglos ópticos propuestos para FILSS.
- Medir y analizar la velocidad de calentamiento en un punto del componente BGA, por el lado anterior y posterior del mismo, al ser aplicado calor durante el proceso de soldado por luz infrarroja enfocada utilizando los arreglos ópticos propuestos para FILSS.
- Analizar el proceso físico de difusión térmica observado en el componente BGA durante el proceso de soldado con los arreglos ópticos propuestos para FILSS.

Lista de Productos derivados de la tesis

A continuación se presenta una lista de los artículos publicados en congresos y conferencias nacionales e internacionales derivados del desarrollo de la presente tesis.

- [1] M. Félix, C. Anguiano, A. Medel, D. Salazar, H. Márquez, “Optimization of the Optical Setup for an SMT Devices Infrared Soldering Rework Station”, 1er. Congreso Internacional de Instrumentación y Ciencias Aplicadas, ICIAS 2010.
- [2] C. Anguiano, M. Félix, A. Medel, M. Muñoz, D. Salazar, H. Márquez, “Modeling and experimental analysis of an optical setup for soldering lead free SMT devices using infrared light”, 2do. Congreso Internacional de Instrumentación y Ciencias Aplicadas, ICIAS 2011.
- [3] C. Anguiano, M. Félix, A. Medel, D. Salazar, H. Márquez, “Heating capacity analysis of a focused infrared light soldering system”, 37va. Conferencia Anual de la IEEE Sociedad Electrónica Industrial, IECON’2011, ISSN: 1553-572X, Print ISBN:978-1-61284-969-0.
- [4] M. Félix, C. Anguiano, E. Ramos, M. Ramos, J. Chacón, “Análisis de distribución de luz en sistema óptico con matriz de multilentes para soldar componentes electrónicos SMT con luz infrarroja”, Congreso de Instrumentación SOMI XXVII, 2012, ISBN:978-607-02-4363-9.
- [5] M. Félix, C. Anguiano, A. Medel, D. Salazar, H. Márquez, “ Infrared thermography of BGA’s heated by focused infrared light Soldering system”, presentado en la Conferencia Internacional de Microsistemas, ensamble de empaquetados y Tecnología de Circuitos, IMPACT’2012, ISSN : 2150-5934, E-ISBN :978-1-4673-1637-8, Print ISBN:978-1-4673-1635-4
- [6] M. Félix, C. Anguiano, A. Medel, D. Salazar, H. Márquez, “Infrared thermography of integrated circuits heated by focused IR light soldering system”, Conferencia de Óptica y Fotónica de Latino América, LAOP’2012.
- [7] C. Anguiano, E. Ramos, M. Ramos, J. Chacón, M. Félix, “Análisis y simulación de sistema óptico con matriz de multilentes para soldar componentes electrónicos SMT con luz infrarroja”, Congreso Internacional, Vértice 2012.
- [8] C. Anguiano, M. Félix, A. Medel, D. Salazar, H. Márquez “Study of optical setup using integrating lens for solder BGA devices”, Congreso Mexicano de Óptica y Fotónica, MOPM 2013.

- [9] M. Félix, A. Medel, M .Bravo, C.Anguiano , D. Salazar, H. Márquez, “ Heated area measurement and analysis of optical setups for focused IR light soldering system”, 39na. Conferencia Anual de la IEEE Sociedad Electrónica Industrial, IECON'2013, ISSN: 1553-572X.

Un artículo arbitrado fue derivado de la presente tesis:

- [10] C. Anguiano, M. Félix,; A. Medel, M .Bravo, D. Salazar, H. Márquez, “Study of heating capacity of focused IR light soldering systems”, Optics Express, Vol. 21 Issue 20, pp.23851-23865 (2013).

Se encuentra en trámite la patente de un arreglo óptico propuesto para FILSS:

- [11] M. Félix, C. Anguiano, A. Medel, D. Salazar, H. Márquez, Sistema Homogeneizador de luz para re-trabajo, IMPI-00-009, recibido en la Delegación de la Secretaria de Economía y oficinas Regionales del IMPI.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Strauss, *SMT Soldering Handbook* (Newnes, 1998) Cap. 1.
- [2] N.-C. Lee, *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies* (Newnes, 2002), Cap. 1,4.
- [3] Orozco Roldan Francisco Ramón, López Gálvez Cristóbal, “Soldadura en atmosfera natural”, Ediciones Paraninfo, S.A., pp. 128-129.
- [4] E. Bradley, C. Handwerker, J. Bath, R. Parker, and R. Gedney, *Lead-Free Electronics*, JohnWiley & Sons Inc., 2007, Cap. 1,5 y 10.
- [5] J. Bath, *Lead-Free Soldering* (Springer, 2007), Cap. 3 y 5.
- [6] K. J. Puttlitz, K. A. Stalter, “Handbook of lead-free solder technology for Microelectronics Assemblies”, Marcel Dekker, Inc., ISBN: 0-8247-4870-0, 2004, Part I.
- [7] Katsuaki Suganuma, “Lead-Free soldering in Electronics”, Marcel Dekker, Inc., ISBN:0-8247-4102-1, 2004, Cap. 1- 3.
- [8] E. P. Leng, M. Ding, W. T. Ling, N. Amin, A. I. M. Y. Lee, and A. S. M. A. Haseeb, “A study of SnAgNiCo vs Sn_{3.8}AgO. 7Cu C5 lead free solder alloy on mechanical strength of BGA solder joint,” *Proceedings of IEEE on Electronics Packaging Technology Conference, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Singapore, (2008), 588–594.*
- [9] T. Novak and F. Steiner, “Influence of intermetallic compounds growth on properties of lead-free solder joints,” *Proceedings of IEEE on International Spring Seminar on Electronics Technology, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Bad Aussee, 2012), 213–217.*
- [10] A. Raj and T. Latha, *VLSI Design* (PHI, 2008), pp. 1–4.
- [11] C. Chun-Chi, Y. Li, H. Li, y C. Wang, “Fine pitch BGA solder joint split in SMT process,” *Proceedings of IEEE on International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Taipei, 2009), 602–605.*
- [12] T. Kangasvieri, J. Halme, J. Vahakangas, y M. Lahti, “Broadband BGA-Via transitions for reliable RF/microwave LTCC-SiP module packaging,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers), **18**(1), 34–36, (2008).
- [13] L. Nie, M. Osterman, F. Song, J. Lo, R. Lee, y M. Pecht, “Solder ball attachment assessment of reballed plastic ball grid array packages,” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 901–908 (2009).
- [14] P. L. Tu, Y. C. Chan, K. C. Hung, and J. K. L. Lai, “Comparative study of micro-BGA reliability under bending stress,” *IEEE transactions on Advanced Packaging*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 750–756 (2000).
- [15] J. Gao, Y. Wu, y H. Ding, “Micro-BGA package reliability and optimization of reflow soldering profile,” *Proceedings of IEEE International Conference on Asian Green Electronics*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, China, 2005), 135–139.
- [16] Y. L. Tzeng, E. Chen, J. Y. Lai, Y. P. Wang, and C. S. Hsiao, “Stress and thermal characteristic analyses for advanced FCBGA packages,” *Proceedings of IEEE on*

- International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference*,
(Institute of Electrical and Electronics Engineers, Taiwan, 2006), 1–4.
- [17] S. L. Kanuparthi, J. E. Galloway, y S. McCain, “Impact of heatsink attach loading on FCBGA package thermal performance,” *Proceedings of IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, San Diego, Ca., 2012), 216–223.
 - [18] B. Y. Jung, J. Y. Gim, J. D. Kim, C. H. Lee, M. Jimares, N. Islam, y R. Darveaux, “Study of FCMBGA with low CTE core substrate,” *Proceedings of IEEE on Electronic Components and Technology Conference*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, San Diego, Ca., 2009), 301–304.
 - [19] H. G. Sy, P. Arulvanan, y P. A. Collier, “Rework and reliability of QFP and BGA lead-free assemblies,” *Proceedings of Conference on Electronics Packaging Technology*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Singapore, 2002), 194–199.
 - [20] K. Dusek, M. Novak, y A. Rudajevova, “Study of the components self alignment in surface mount technology,” *Proceedings of IEEE on Seminar on Electronics Technology*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Bad Aussee, 2012), 197–200.
 - [21] M. Pecht, *Soldering Process and Equipment* (John Wiley & Sons Inc., 1993), Cap.4.
 - [22] N. Heilmann, “A comparison of vapor phase, infrared and hot gas soldering,” *Proceedings of IEEE Electronic Manufacturing Technology Symposium*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Neuilly sur Seine, 1988), 70–72.
 - [23] K. E. Bahr, A. V. Sedrick Jr, *Focused Convection Reflow Soldering Method and Apparatus*, número de patente: 4,771,929, (1988)
 - [24] Sakuyama, S. Uchida, H. ; Watanabe, I. ; Natori, K. ; Sato, T., “Reflow Soldering Using Selective Infrared Radiation”, *Electronic Manufacturing Technology Symposium*, 1995, *Proceedings of 1995 Japan International, 18th IEEE/CPMT International*, pp. 393 – 396, ISBN:0-7803-3622-4
 - [25] R. N. Cox, *Reflow Technology Handbook* (Research Inc., 1992), Cap. 1.
 - [26] R. H. Gibbs y D. J. Lowrie, *Infra-red Rework Station*, número de patente: 4,843,216 (1989)
 - [27] C. Anguiano, M. Félix, A. Medel, D. Salazar, and H. Márquez, “Heating capacity analysis of a focused infrared light soldering system,” *Proceedings of Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Melbourne, 2011), 2136–2140.
 - [28] M. Félix, C. Anguiano, A. Medel, M. Bravo, D. Salazar, H. Márquez, y J. Chacon, “Infrared thermography of integrated circuits heated by focused IR light soldering system”, *Conference of Latin America Optics and Photonics*, (Optical Society of America, 2012), paper LTC4.3.
 - [29] C. Anguiano, M. M. Félix, A. Medel, M. Bravo, D. Salazar, H. Márquez, “Study of heating capacity of focused IR light soldering systems”, *Optics Express*, Vol. 21 Issue 20, pp.23851-23865 (2013).
 - [30] S. Bahaa and T. Malvin, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons Inc., (1991), Cap. 1.
 - [31] E. Hecht, *Optics*, Addison Wesley, 4^{ta}. Edición, (2002), Cap. 5

- [32] W. Smith, *Modern Optical Engineering*, McGraw-Hill, (2000), Cap.3, 5, 10, 11 y 12.
- [33] Newport catalog, 2011/2012 Newport Resource.
- [34] C. Pruss, E. Garbusi, and W. Osten, "Testing aspheres," *Opt. Photon. News* **19**(4), 24–29 (2008).
- [35] Engineered diffusers™ for display and illumination systems: Design, fabrication, and applications, <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/897.PDF>
- [36] J. Carlton, *Frames and Lenses* (Slack incorporated, 2000), pp. 68.
- [37] N. A. Fomin, *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements* (Springer-Verlag, 1998), Cap. 5.
- [38] F. M. Dickey, S. C. Hoswade, and D. L. Shealy, *Laser Beam Shaping Applications* (Taylor & Francis, 2005), Cap. 8.
- [39] Edmund Optics, "Anti-Reflection (AR) Coatings",
<http://www.edmundoptics.com/technical-resourcescenter/optics/anti-reflection-coatings/?&pagenum=2#coatingspec>
- [40] P. W. Baumeister, *Optical Coating Technology* (SPIE Press Monograph, 2004), Cap. 1.
- [41] <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>
- [42] Product information Bulletin, "64635 HLX Tungsten Halogen Lamp".
- [43] J. Simmons and K. S. Potter, *Optical Materials* (Academic Press, 2000), pp. 175–176.
- [44] A. Locke, "Exploring Physical Optics Propagation in Zemax",
<http://kben.radiantzemax.com/KnowledgebaseArticle50227.aspx>,
October 31, (2005).
- [45] Technical/ Sheet glasses, "optical-glass-n-bk7-b270-and-others-data-sheet,"
<http://www.crystran.co.uk/userfiles/files/optical-glass-n-bk7-b270-and-others-data-sheet.pdf>
- [46] <http://lopezva.files.wordpress.com/2011/10/cap19.pdf>
- [47] J. P. Holman, *Transferencia de calor*, Mc Graw Hill, Octava edición (primera en español) (1998), Cap. 8.
- [48] R. R. Tummala, E. J. Rymaszewski, and A. G. Klopfenstein, *Microelectronics Packaging Handbook* (Springer, 1997), pp. I-322.