

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

TESIS DE MAESTRÍA

Simulación de un Sistema para Soldar Múltiples Componentes SMD
en un PCB con Luz Infrarroja.

Autor:

Ing. Jorge Romo García

Directora de Tesis:
Dra. Rosa Citlalli Anguiano Cota

Co-Director de Tesis:
Dr. Rigoberto Herrera García

*Tesis presentada para obtener el grado de maestría en ciencias por la
Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California*

17 de Junio de 2021



Declaración de Autoría

Yo, Jorge Romo García declaro que esta tesis titulada, “Simulación de un sistema para soldar múltiples componentes SMD en un PCB con luz infrarroja” y que todo el trabajo que aquí se presenta es de mi autoría y está expresado en mis propias palabras y que cualquier uso de trabajo de otros autores está debidamente referenciado.

Firma:



Fecha:

_____ 17 de Junio de 2021 _____

“Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es un océano.”

Isaac Newton

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Resumen

Facultad de Ingeniería
Campus Mexicali

Simulación de un sistema para soldar múltiples componentes SMT en un PCB con luz infrarroja.

por Jorge Romo García

En este trabajo de tesis de maestría se presenta la simulación de un sistema de soldadura para componentes electrónicos de tecnología de montaje superficial (SMT por sus siglas en inglés) utilizando radiación infrarroja producida por diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés).

El objetivo fue simular un sistema de soldadura que permita controlar la temperatura por zonas en la superficie de un placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés), de esta manera se logra suministrar la temperatura de reflujo requerida para cada componente SMT presente en un PCB, para esto se eligieron dos fuentes de radiación infrarroja LED con emisiones en longitudes de onda de 860nm y 960nm respectivamente y se simuló la irradiancia sobre un PCB producida por un arreglo matricial de 100 fuentes LED en un área de 60mm x 60mm irradiando a 60mm de distancia normal.

Posteriormente se muestra el diseño de un reflector con conductos de luz cuadrados con entrada cónica para enfocar la irradiancia de cada elemento de la matriz de LED sobre la superficie del PCB y un análisis de elementos finitos para estudiar la temperatura que alcanza el PCB.

Reconocimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo ofrecido a los estudiantes de posgrado y fomentar el desarrollo de investigadores.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por guiarme durante mi desarrollo profesional y personal.

A mi directora de tesis, Dra. Rosa Citlalli Anguiano Cota, por permitirme formar parte de este proyecto y apoyarme durante todo el desarrollo con sus conocimientos.

A mi codirector de tesis, Dr. Rigoberto Herrera García, por trabajar en cooperación con la Dra. Rosa Citlalli Anguiano Cota en este proyecto de investigación, y por las clases impartidas durante mis estudios.

A mis compañeros por ayudarme durante todo este tiempo con sus conocimientos y consejos.

Y principalmente a mi familia por todo el apoyo que he recibido a lo largo de mi vida y por siempre alentarme a lograr mis metas.

Índice General

Declaración de Autoría	II
Resumen.....	IV
Reconocimientos.....	V
Índice General.....	VI
Índice de Figuras.....	¡Error! Marcador no definido.
Resumen.....	VII
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	2
3. Diseño y simulación del sistema.....	8
4. Conclusiones.....	42
5. Trabajos futuros.....	43
6. Anexos	44

Resumen

Facultad de Ingeniería
Campus Mexicali

Simulación de un sistema para soldar múltiples componentes SMT en un PCB con luz infrarroja.

por Jorge Romo García

En este trabajo de tesis de maestría se presenta la simulación de un sistema de soldadura para componentes electrónicos de tecnología de montaje superficial (SMT por sus siglas en inglés) utilizando radiación infrarroja producida por diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés).

El objetivo fue simular un sistema de soldadura que permita controlar la temperatura por zonas en la superficie de un placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés), de esta manera se logra suministrar la temperatura de reflujo requerida para cada componente SMT presente en un PCB. Para esto se eligieron dos fuentes de radiación infrarroja LED con emisiones en longitudes de onda de 860nm y 960nm respectivamente y se simuló la irradiancia sobre un PCB producida por un arreglo matricial de 100 fuentes LED en un área de 60mm x 60mm irradiando a 60mm de distancia normal.

Posteriormente se muestra el diseño de un reflector con conductos de luz cuadrados con entrada cónica para enfocar la irradiancia de cada elemento de la matriz de LED sobre la superficie del PCB y un análisis de elementos finitos para simular las temperaturas alcanzadas por el PCB.

1. Introducción

El objetivo de esta investigación fue realizar la simulación de un sistema de soldadura para componentes SMT que permitiera suministrar la temperatura necesaria para conseguir el reflujo en las soldaduras de cada componente presente en el PCB.

El cambio hacia aleaciones de soldadura libres de plomo originado por las directivas de la RoHS (Risk of Hazardous Materials) y WEEE (Waste of Electric and Electronic equipment) en el año 2003 ha originado una amplia gama de aleaciones con puntos de fusión muy elevados con respecto a las soldaduras con plomo, las temperaturas necesarias para alcanzar el reflujo pasaron de alrededor de 180° Celsius hasta temperaturas entre 210° y 260° Celsius para algunas aleaciones.

Si bien esto resulta en una mejora con respecto a la protección del medio ambiente al disminuir la cantidad de plomo presente en los circuitos electrónicos, esto también representa un reto en la fabricación de dispositivos electrónicos pues ahora se requiere de compuestos que soporten mayores temperaturas para las encapsulados de los SMT y de sistemas de soldadura con un control preciso de la temperatura, pues de acuerdo a (L. Yang, 2001) las altas temperaturas aplicadas en los microchips pueden dañar la integridad de las uniones en las interfaces y comprometen la integridad del empaquetado, es decir, el rango de temperaturas en las que puede operar un componente electrónico durante el proceso de soldadura ha sido considerablemente reducido y es importante que este proceso se lleve a cabo sin exceder la temperatura necesaria indicada por el fabricante del componente.

El sistemas de soldadura para componentes electrónicos SMT más empleado en la actualidad es el horno de reflujo, que consta de una serie de resistencias emisoras de calor que producen

un aumento en la temperatura del aire circundante y mediante convección este calor es transferido a los PCB dentro del horno.

Pero debido a la gran cantidad de aleaciones de soldadura existentes con rangos de temperatura de reflujo que van desde los 200°C hasta los 260° y a que en un mismo PCB se pueden encontrar distintas aleaciones, pueden ocurrir errores durante el proceso de reflujo.

2. Marco teórico.

Desde el desarrollo del primer circuito integrado (IC por sus siglas en inglés) en el año 1958, la miniaturización de la electrónica ha alcanzado magnitudes impresionantes, pasando de un transistor y algunos elementos más en el primer IC a millones de transistores en un espacio de apenas algunos milímetros cúbicos en los IC actuales.

El hecho de tener una cantidad tan grande de componentes en tan poco espacio, hace que la tarea de soldar un IC a una placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés) sea cada vez más complicada.

La tecnología de montaje superficial (SMT por sus siglas en inglés) que consiste en soldar los elementos sobre la misma cara del PCB es actualmente la más utilizada para fabricación de dispositivos electrónicos dejando atrás a la tecnología de agujeros pasantes (THT por sus siglas en inglés) donde cada elemento atraviesa la PCB y es soldado en la cara inversa.

Es imprescindible la mejora en los sistemas de soldadura SMT pues estos van de la mano con la reducción del tamaño de los componentes electrónicos, y estos son cada vez más complejos pues las uniones a soldar son de difícil acceso y el umbral de temperatura entre la refusión de la soldadura y el máximo permisible por los componentes es muy reducido.

Se han desarrollado sistemas que permiten soldar componentes SMT en un PCB sin embargo debido a la miniaturización de los componentes y al incremento de la densidad de elementos surgen problemas de soldadura ocasionados por una mala distribución de temperatura en los componentes y problemas ocasionados porque la geometría de los componentes impide la distribución uniforme del flujo de aire caliente en los sistemas de convección forzada.

Se ha encontrado por medio de simulaciones en Zemax que es posible alcanzar temperaturas de reflujo utilizando LEDs infrarrojos de alta potencia en un arreglo matricial, estos permiten que la distribución de irradiancia sea uniforme, además de que es posible lograr un control de temperatura por zonas para que cada dispositivo dentro del PCB reciba la potencia necesaria para la aleación de soldadura utilizada.

Desde el año de 1947 con la invención del transistor por John Bardeen, Walter Houser y William Shockley y posteriormente en 1958 con la creación del primer circuito integrado por Jack S. Kilby [1] la electrónica tuvo un avance espectacular, desde entonces ha ocurrido un proceso de miniaturización impresionante de los componentes electrónicos. Como predijo Gordon E. Moore aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un microprocesador [2] y en general los componentes han tendido a ocupar cada vez menos espacio.

En años recientes, el empaquetado de semiconductores ha evolucionado con una demanda de mayores funcionalidades, un tamaño menor, y utilidad añadida [3], esto ha llevado a que cada vez las tarjetas de circuito impreso (PCB) tomen un papel más relevante pues es requerido que sus dimensiones se reduzcan al mínimo en el caso de dispositivos como teléfonos, computadoras, televisores etc.

Las tecnologías para soldar componentes electrónicos también han evolucionado a lo largo de las décadas desde la aparición de las primeras PCB utilizadas para la fabricación de radios [7].

Primero apareció la tecnología de agujeros pasantes (THT) en la cual las PCB contaban con agujeros por los que pasan las terminales de los componentes electrónicos y son soldadas por el lado opuesto, ofreciendo una unión muy robusta entre los componentes y la placa pero con la desventaja de la elevación en los costes por la necesidad de perforar el PCB además de que tiene limitantes en cuanto a la cantidad de componentes que se pueden soldar en un solo PCB [8].

Posteriormente, en la década de los 60 fue desarrollada la tecnología de montaje superficial SMT por Siemens e IBM principalmente pero fue a partir de la década de los 90 cuando esta dominó en los procesos de fabricación de dispositivos electrónicos, se desarrollaron componentes con pequeñas terminales metálicas en lugar de pines que son soldadas directamente en la superficie de la PCB, esto permitió la reducción en las dimensiones de los componentes y en consecuencia la posibilidad de incrementar la densidad de componentes en una PCB, y con esto la reducción de las dimensiones de los dispositivos electrónicos, pero a costa de una notable reducción de la resistencia mecánica de las uniones soldadas y una capacidad menor de potencia en comparación con la THT además de un aumento en la complejidad de los procesos de soldadura debido a que las uniones a soldar son cada vez más compactas e inaccesibles [5].

La THT sigue en uso para productos que son sometidos a esfuerzos externos pues ofrece conexiones más fuertes, con el inconveniente de que su automatización es más compleja [4].

A través de los años han aparecido muchos sistemas para soldar componentes electrónicos, los más antiguos como la antorcha de gas, y el cautín que es aún utilizado principalmente para THT en producción de baja escala, pero que son ya inadecuados para los PCB densamente poblados producidos en la actualidad. Estos son sistemas donde el contacto de la fuente de calor está localizado directamente sobre una unión específica a soldar.

Para la producción a gran escala contamos con los sistemas de horno de reflujo y soldadura por ola, que permiten soldar un PCB completo simultáneamente, en los que la aplicación de calor ocupa un área mucho mayor en comparación con los sistemas enfocados, existe un tercer método ahora en desuso debido a preocupaciones ambientales por el uso de solventes base clorofluorocarbonos (CFC) llamado soldadura de reflujo en base vapor [9].

El horno de soldadura por reflujo es usado principalmente para componentes SMT, los componentes son puestos sobre la PCB junto con el Flux y la soldadura, una vez poblada la PCB se coloca en un horno, este se programa para incrementar gradualmente la temperatura del PCB y los componentes, con el incremento de temperatura se activa el flux y finalmente se alcanza la fundición de la temperatura conocida como reflujo, una vez realizada la soldadura se controla el enfriamiento del PCB.

Existen varias fuentes de calor utilizadas para el horno de reflujo, como la convección forzada, las lámparas infrarrojas, y resistencias.

La convección forzada consiste en crear un flujo de aire caliente y hacerlo pasar a través de la PCB y es la más utilizada actualmente, la geometría de algunos componentes puede significar un flujo desigual de aire caliente que genere una distribución no uniforme de

temperatura, además que el flujo de aire caliente transfiere energía cinética a los componentes con la posibilidad de generar desajustes en su posición.

Las lámparas infrarrojas constan de aplicar calor por medio de radiación electromagnética que es absorbida por los componentes el inconveniente de estos sistemas se debe a que cada material absorbe la radiación a una velocidad diferente, provocando sobrecalentamiento en algunos componentes y calentamiento insuficiente en otros es decir, una distribución no uniforme de temperatura y en consecuencia puede generar una soldadura deficiente, es necesario asegurar una distribución uniforme de la temperatura [7].

La soldadura por ola fue el sistema predominante para producción masiva de PCB, ahora relevado a un segundo plano por el auge de los sistemas de reflujo por horno principalmente por el incremento en el uso de componentes SMT, consta de un depósito de soldadura en estado líquido que se hace circular para formar una ola estacionaria, los componentes son mecánicamente fijados al PCB de acuerdo a su empaquetado, su principal ventaja es la velocidad a la que son formadas las uniones de soldadura pero su desventaja es la gran complejidad de los sistemas de soldadura y la gran cantidad de variables asociadas al proceso.

La soldadura por reflujo base vapor funciona de manera similar a otros métodos por reflujo, pero en esta el calor es aplicado por medio de un líquido vaporizado que alcanza una temperatura superior a la necesaria para fundir la soldadura y menor a una temperatura que ocasione daños a los componentes, sus desventajas radican en el uso de CFC aunque ahora se opta por el uso de hidrofluorocarbonos (HFC) aun así el costo de estos materiales es muy alto.

Existe también el sistema de laser infrarrojo controlado por CNC que es enfocado hacia las uniones a soldar, debe ser programado de acuerdo al diseño de la PCB, presenta ciertos inconvenientes:

- No funciona para empaquetados de matriz de rejilla de bolas (BGA) pues las uniones a soldar están por debajo del encapsulado y son inaccesibles para el láser.
- Necesita ser programado para cada diseño de PCB por lo que es más compleja su implementación.

Para la producción masiva de dispositivos se emplean los sistemas de soldadura por reflujo, con una tendencia hacia la convección forzada sobre los otros sistemas.

3. Diseño y simulación del sistema.

Una vez estudiados los sistemas de soldadura para componentes SMT y analizando los defectos más comunes que ocurren durante el proceso de reflujo, se propone utilizar una fuente de radiación infrarroja LED para proporcionar la irradiancia requerida por los componentes para el proceso de soldadura.

Las fuentes infrarrojas LED, a diferencia de la convección forzada que actualmente es la más utilizada en la producción masiva de dispositivos electrónicos, no precisa de un flujo de aire caliente que puede ocasionar desalineamientos en los componentes y una mala distribución del flujo de calor debido a la geometría de los componentes SMT, además el control del flujo radiante es sencillo, y las pérdidas de potencia por disipación se ven reducidas pues no es necesario calentar un volumen de aire, en su lugar, la radiación es dirigida directamente a los componentes y esto representa una eficiencia más elevada.

4.1 Selección y estudio de la fuente infrarroja

La primera tarea fue buscar fuentes infrarrojas tipo LED de alta potencia y de uso comercial que tuvieran un uso en operaciones de calentamiento, de los dispositivos investigados fueron seleccionados dos números de parte que cumplen con los requerimientos planteados: alta potencia y longitud de onda dentro del espectro infrarrojo.

Un factor relevante para seleccionar la fuente LED es su dimensión, pues es requerido concentrar una alta potencia en un espacio reducido para poder suministrar la irradiancia necesaria para alcanzar temperaturas superiores a 240° C.

En la figura 4.1.1 se muestra el LED SFH 4716 AS de Osram Opto semiconductors y en la figura 4.1.2 se muestran las dimensiones.

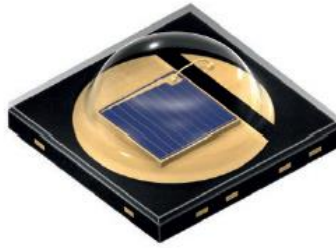


Figura 4.1.1 LED SFH 4716 AS

(Imagen propiedad de OSRAM Opto semiconductors).

El LED infrarrojo SFH 4716 AS de la figura 4.1.1 puede entregar un flujo radiante de 1530mW en operación continua con un pico de longitud de onda de 860nm, sus dimensiones son de 3.85mm x 3.85mm , como se muestra en la figura 4.1.2, lo que permite una densidad de potencia alta al crear un arreglo matricial.

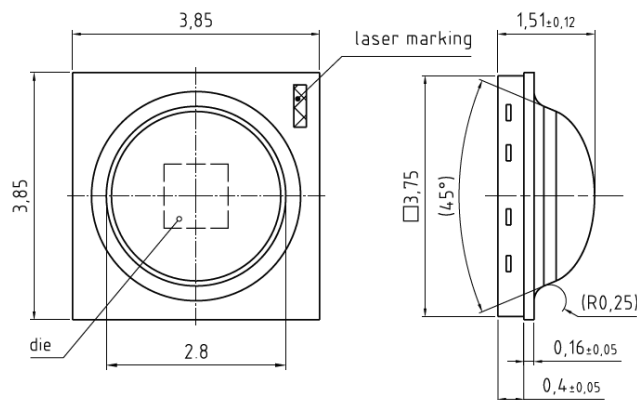


Figura 4.1.2 Dimensiones del LED SFH 4716 AS de Osram Opto Semiconductors.

(Imagen propiedad de OSRAM Opto semiconductors).

En la figura 4.1.3 se observa el espectro de emisión del LED infrarrojo SFH 4716 AS con el pico en 860 nm lo que lo coloca dentro del infrarrojo cercano.

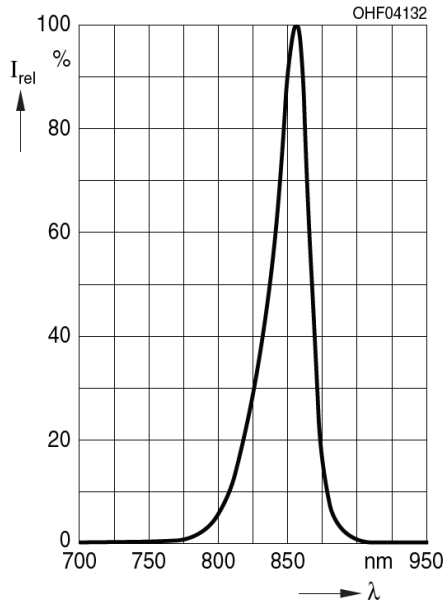


Figura 4.1.3 Espectro de emisión del LED SFH 4716 AS

(Imagen propiedad de OSRAM Opto semiconductors).

El segundo LED infrarrojo seleccionado es el SFH 4726 AS de Osram Opto semiconductors, tiene características similares al SFH 4716 AS en cuanto a potencia y dimensiones, entrega un flujo radiante de 1580mW ligeramente superior al anterior, pero la característica por la que fue seleccionado es el pico de su espectro de emisión que se encuentra en 960nm como se muestra en la figura 4.1.4.

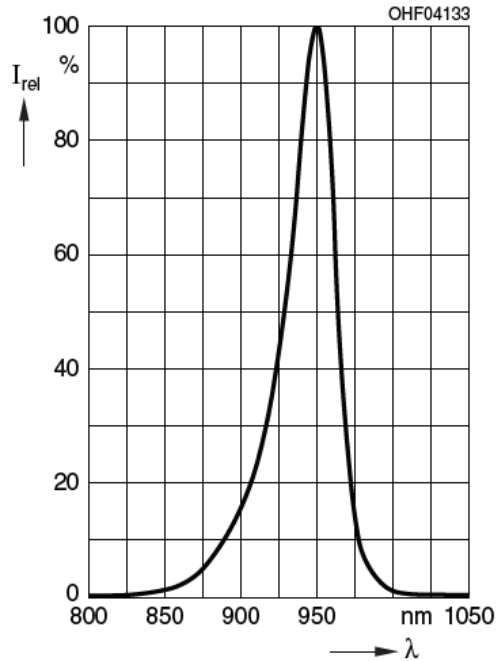


Figura 4.1.4 Espectro de emisión del LED SFH 4726 AS

(Imagen propiedad de OSRAM Opto semiconductors).

Estas fuentes infrarrojas LED fueron seleccionadas por su potencia de emisión y por contar con distintas longitudes de onda dentro del espectro infrarrojo para posteriormente realizar un estudio de la absorción en los componentes SMT de estas longitudes de onda.

A continuación se realizó una simulación por trazado de rayos del LED SFH 4726 AS, para fines de simplificación los resultados obtenidos para este LED se extrapolan para el LED SFH 4716 AS debido a que sus características de irradiancia y dimensionales son prácticamente iguales, y su diferencia en cuanto al pico del espectro de emisión no son tomados en cuenta en este análisis.

Utilizando el software Zemax LLC para el trazado de rayos de una fuente emisora, realizamos la simulación de la irradiancia producida por el LED SFH 4716 AS sobre un detector con

una superficie de 60mm x 60mm a una distancia normal de 10mm como se muestra en el esquema de la figura 4.1.5.

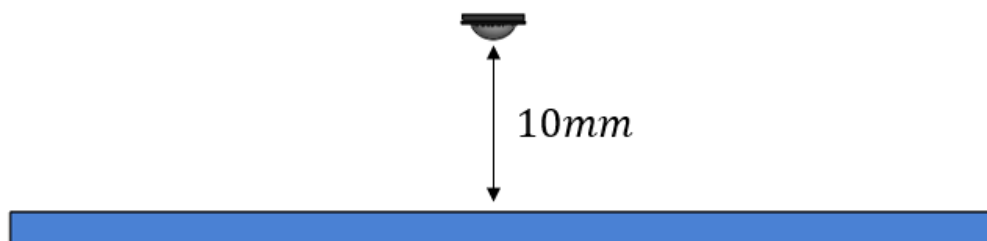


Figura 4.1.5 Esquema de la configuración de un LED a 10mm de distancia normal.

La distancia para esta configuración fue elegida de manera arbitraria como punto de partida para estudiar la irradiancia producida por un LED infrarrojo sobre una superficie plana que simula un PCB, posteriormente se tomaron consideraciones con respecto a la distancia para garantizar la operación de los LED dentro de los rangos recomendados por el fabricante.

En la figura 4.1.6 se observa los rayos emitidos por la fuente sobre la superficie del detector del simulador, la cantidad de rayos mostrados en este gráfico solo tiene fines ilustrativos y no representa la cantidad de rayos utilizados para la simulación.

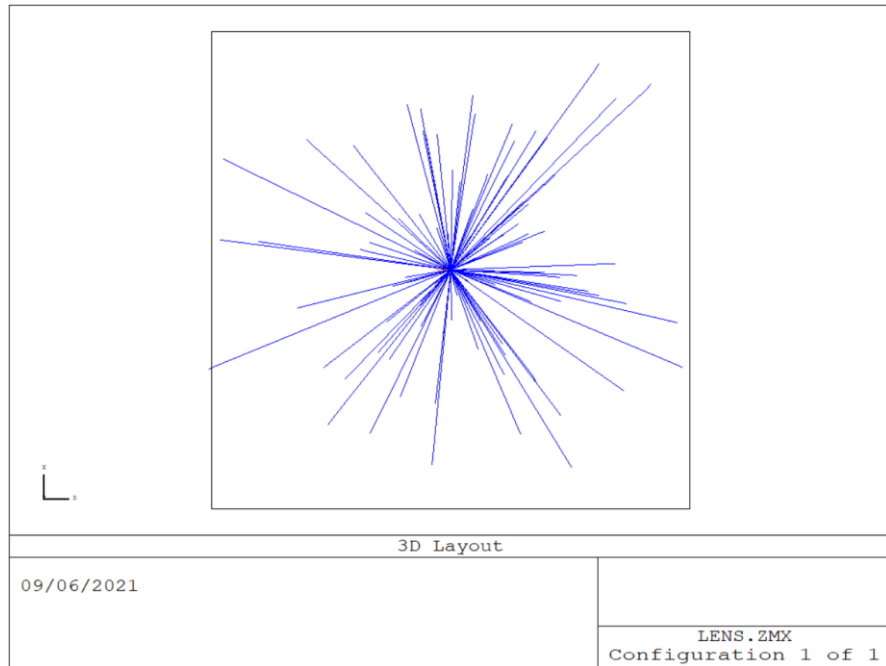
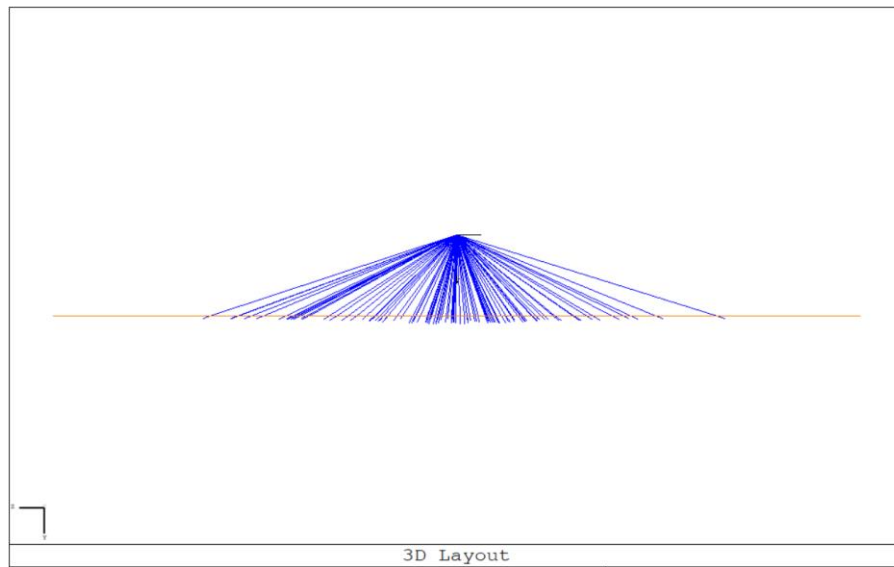


Figura 4.1.6 Trazado de rayos de una fuente LED en Zemax en vista superior.



4.1.7 Vista lateral del trazado de rayos de la simulación realizada.

Utilizando la configuración descrita en la figura 4.5 se simuló la irradiancia sobre la superficie con 1 millón de rayos trazados y se obtuvo la distribución que se muestra en la figura 4.1.8.

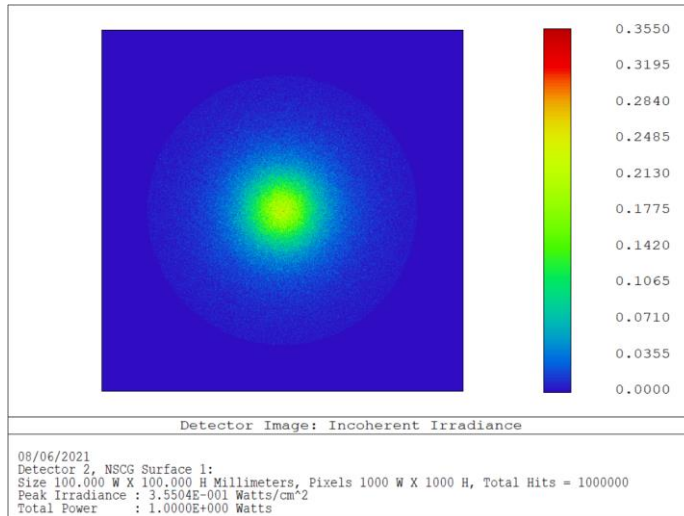


Figura 4.1.8 Irradiancia obtenida en la superficie del detector.

Para esta configuración se obtiene una distribución de irradiancia con un rango desde 0 hasta $0.3550 \frac{W}{cm^2}$, el 100% de la potencia irradiada alcanza la superficie del detector.

Es importante señalar que solo los LED cercanos a la zona central del detector pueden entregar la mayor parte de su irradiancia sobre la superficie, si colocamos un LED en un extremo gran parte de su irradiancia se perderá por lo que su eficiencia se verá reducida como se muestra en la imagen 4.1.9. Para esta configuración solo el 25% de la potencia irradiada por el LED llega a la superficie del detector, esta es la eficiencia mínima obtenida para un LED del arreglo.

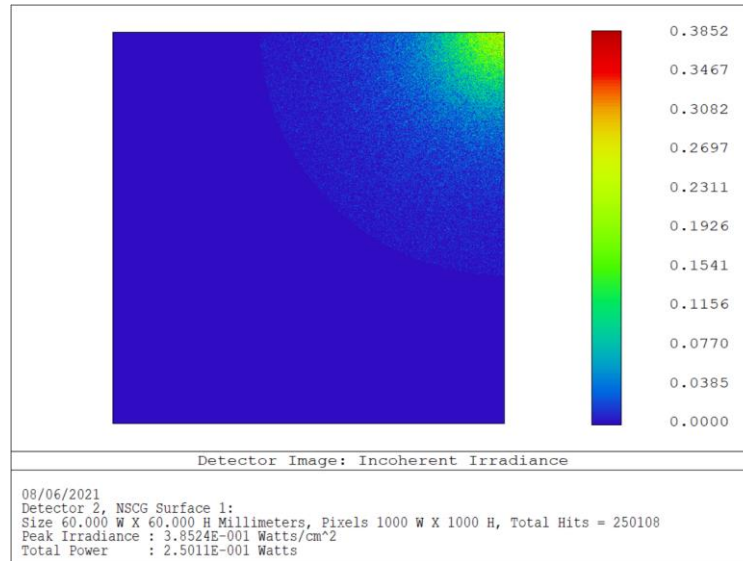


Figura 4.1.9 Irradiancia obtenida en la superficie del detector.

En la configuración de la figura 4.1.10 se obtiene el 48.8% de la irradiancia en la superficie del detector.

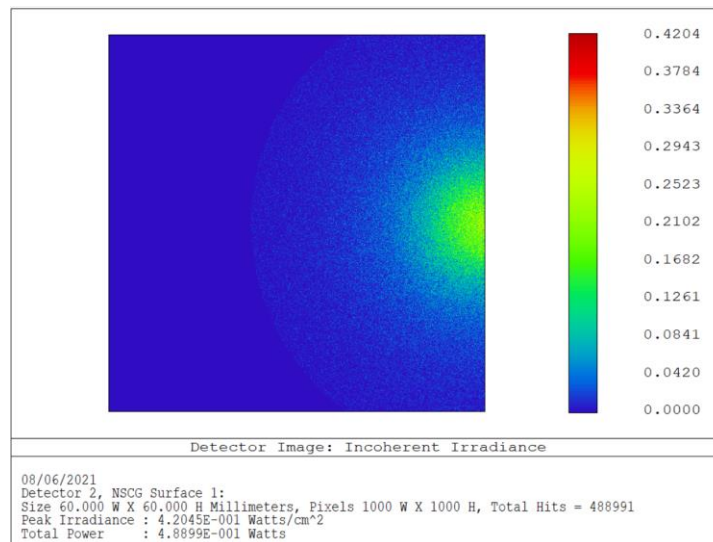


Figura 4.1.10 Irradiancia obtenida en la superficie del detector.

Dadas las configuraciones estudiadas se obtuvo una distribución de irradiancia con alta eficiencia en la zona central del detector, mientras que en las zonas externas una eficiencia

baja, por lo que se concluye que las dimensiones efectivas del sistema serán ligeramente menores a las dimensiones del arreglo de LEDs.

4.2 Diseño del arreglo matricial

Si bien existen arreglos de múltiples fuentes infrarrojas LED en un solo dispositivo SMT de alta potencia, esta opción ha sido descartada debido a que no permite el control individual de cada dispositivo, lo que es necesario para lograr un control de temperatura por zonas en la superficie del PCB, es por esto que se eligió diseñar un arreglo matricial de fuentes infrarrojas LED individuales, es decir, un dispositivo LED por cada encapsulado, para con esto tener una alta densidad de potencia por las dimensiones reducidas de las fuentes seleccionadas y además la posibilidad de controlar cada dispositivo individualmente.

El arreglo planteado consta de 100 LED SFH 4716 AS, las distancias entre LED utilizadas son las mínimas recomendadas por el fabricante para una correcta operación, por lo que esta configuración representa la máxima densidad de LED que se puede obtener y por lo tanto la máxima irradiancia.

En la figura 4.2.1 se muestra un arreglo matricial de 10x10 fuentes infrarrojas LED, en conjunto la potencia irradiada por el arreglo es de 153W para el LED SFH 4716 AS y de 158W para el LED SFH 4726 AS, para fines de simplificación del análisis, todas las simulaciones se realizaron con el LED SFH 4716 AS y los resultados pueden ser aplicados también para el LED SFH 4726 AS, en estudios posteriores donde se tome en cuenta la longitud de onda se realizarán simulaciones individuales.

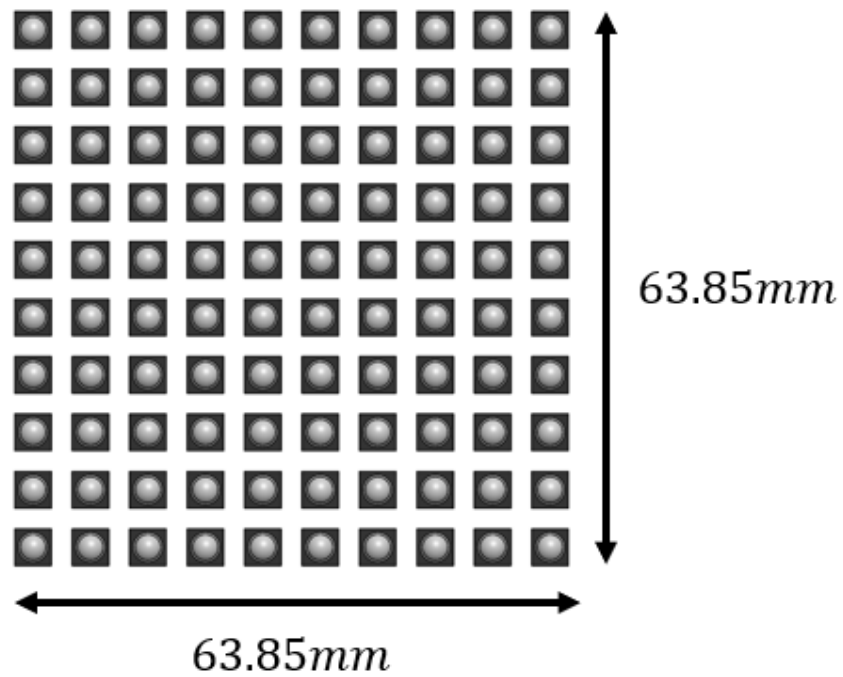


Figura 4.2.1 Arreglo matricial de fuentes infrarrojas LED.

La potencia irradiada por el arreglo matricial en la simulación fue dirigida a un detector de dimensiones 60mm x 60mm que representa la superficie de un PCB y a una distancia normal de 10mm como se muestra en la configuración de la figura 4.2.2. y 4.2.3.

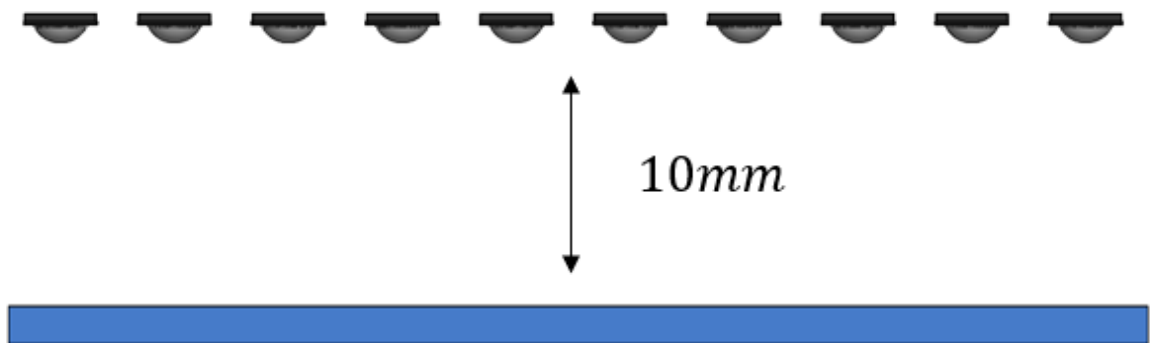


Figura 4.2.2 Configuración del arreglo matricial y superficie en vista lateral.

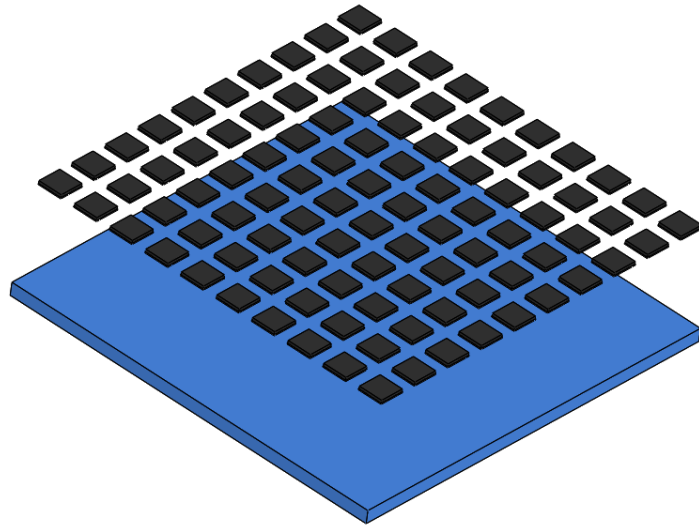


Figura 4.2.3 Configuración del arreglo matricial y superficie en vista isométrica.

Al realizar una simulación con 100 millones de rayos con la configuración de la figura 4.2.3 se obtiene una distribución de irradiancia mostrada en la figura 4.2.4, se observa claramente el resultado esperado a partir de las simulaciones con LED individuales, una distribución uniforme central en la superficie del PCB y la pérdida de potencia en los alrededores, en la región central indicada por el recuadro rojo se alcanza una irradiancia de $4.7645 \frac{W}{cm^2}$ que se mantiene relativamente uniforme con una media de $4.181 \frac{W}{cm^2}$.

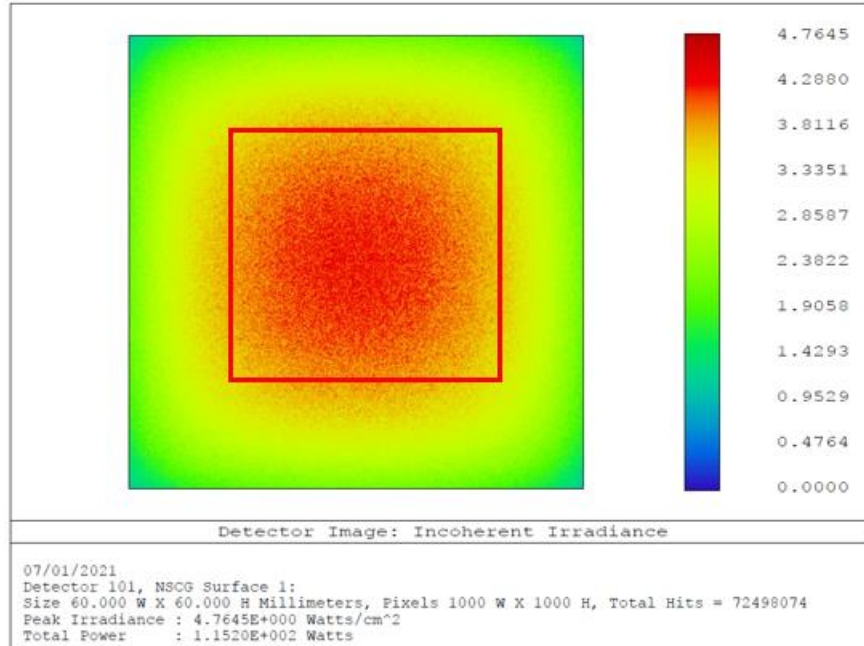


Figura 4.2.4 Distribución de irradiancia de una matriz de 100 LED.,

En la figura 4.2.5 se muestra la distribución de irradiancia de la simulación realizada, la zona señalada con el recuadro rojo será considerada como la zona de distribución uniforme de irradiancia con una media de $4.181 \frac{W}{cm^2}$, las oscilaciones de los datos se atribuyen a la aleatoriedad de la simulación, la incertidumbre es reducida con un aumento en la cantidad de rayos o con una disminución en la resolución del detector, se realizaron simulaciones con distintas configuraciones de estas dos variables y la irradiancia media no tiene cambios significativos, además para este punto del análisis estas variaciones son irrelevantes.

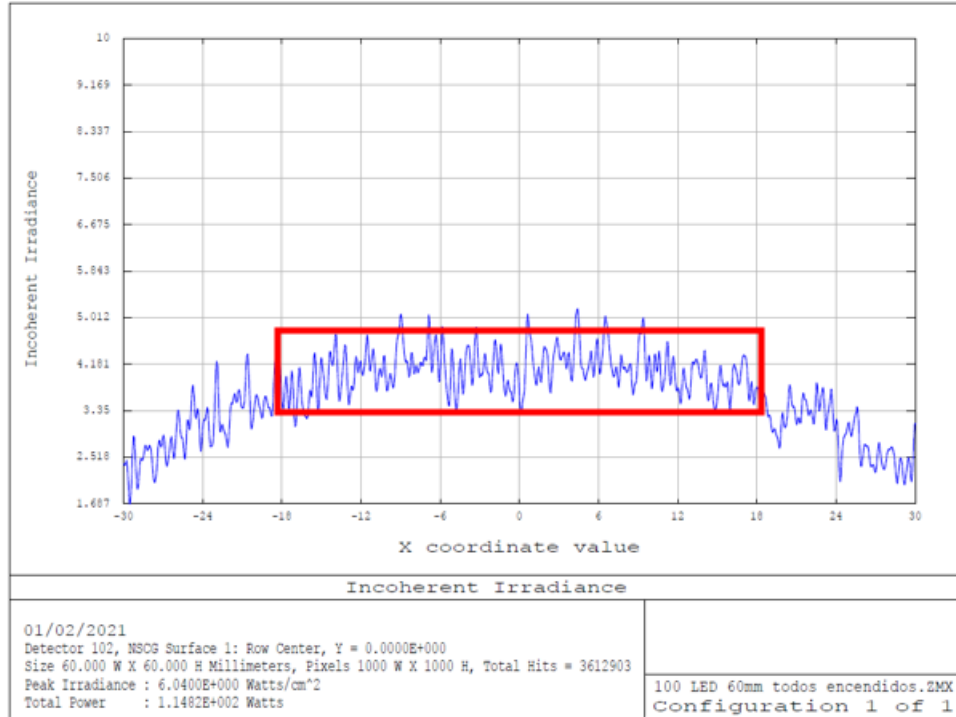


Figura 4.2.5 Vista en sección de la irradiancia en la superficie del detector.

Con la irradiancia media medida en la simulación se realizó un análisis de elementos finitos para observar el incremento en la temperatura de una superficie caracterizada con las propiedades mecánicas del FRP-4, material compuesto utilizado para fabricar PCB.

4.3 Análisis de elementos finitos de la irradiancia de la matriz sobre una superficie.

El análisis por elementos finitos es una herramienta computacional basada en el método por elementos finitos, a grandes rasgos el objeto de estudios se discretiza en una matriz de elementos interconectados con relaciones y características físicas definidas.

Para este estudio se utilizó el software ANSYS Workbench 19.2 con la herramienta de análisis térmico de estado transitorio que permite observar el efecto de las condiciones de frontera térmicas aplicadas a un sistema a través del tiempo.

Para esta simulación se modeló en SolidWorks una superficie de 36mm x 36mm x 1.5 mm que corresponde a la superficie que recibe una irradiación uniforme señalada con el recuadro rojo de la figura 4.2.4 y 4.2.5.

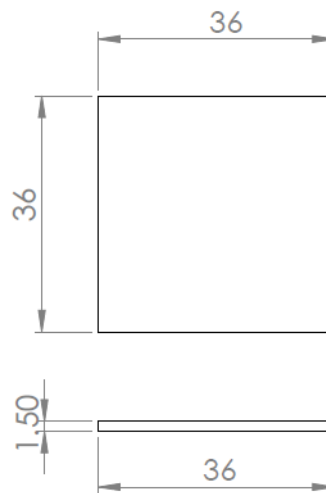


Figura 4.3.1 Plano de la superficie modelada en Solidworks.

Se aplicaron las características del material FR-4 Epoxy de la biblioteca de materiales de ANSYS Workbench 19.2, este es un material compuesto de fibra de vidrio y resina epóxica, es utilizado para la fabricación de PCB, las características físicas se muestran en la tabla de la figura 4.3.2 obtenida del programa.

Properties of Outline Row 5: FR-4 Epoxy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1900	kg m ⁻³	
4	Isotropic Thermal Conductivity	0.294	W m ⁻¹ C ⁻¹	
5	Specific Heat, C _p	1150	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

Figura 4.3.2 Tabla de propiedades físicas de FR-4 Epoxy de ANSYS Workbench 19.2.

Para estudios posteriores se realizará la simulación en materiales utilizados para los encapsulados de dispositivos SMT.

A la superficie se le aplica un flujo de calor de 54.2 W , este flujo de calor es obtenido al multiplicar la irradiancia promedio de $4.181 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ por la superficie de 12.96 cm^2 , se considera una distribución completamente uniforme para fines de simplificar el análisis, en la figura 4.3.2 se muestra la condición de frontera en ANSYS Workbench 19.2.

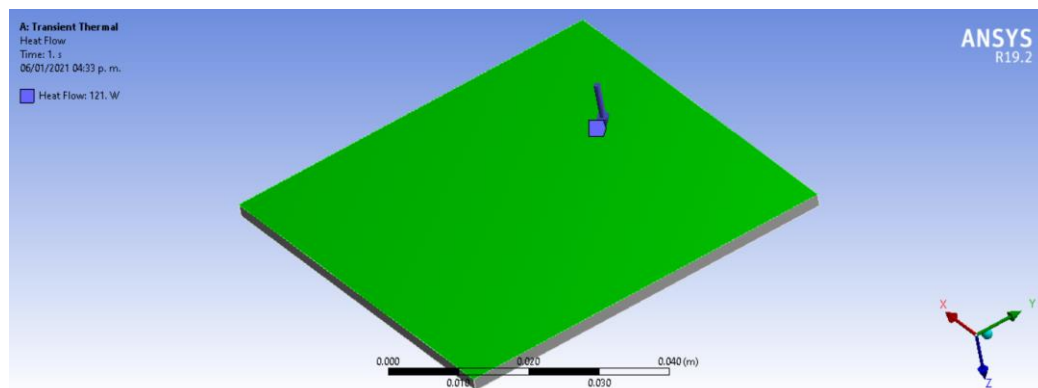


Figura 4.3.2 Flujo de calor aplicado en la superficie del PCB de FR-4 Epoxy.

Cuando un objeto recibe radiación infrarroja e incrementa su temperatura, este se convierte a su vez en una fuente emisora de radiación infrarroja, esto implica una pérdida de irradiancia en el PCB y debe ser considerada en el análisis, para esto se aplica la condición de frontera de radiación en ANSYS como se muestra en la figura 4.3.3.

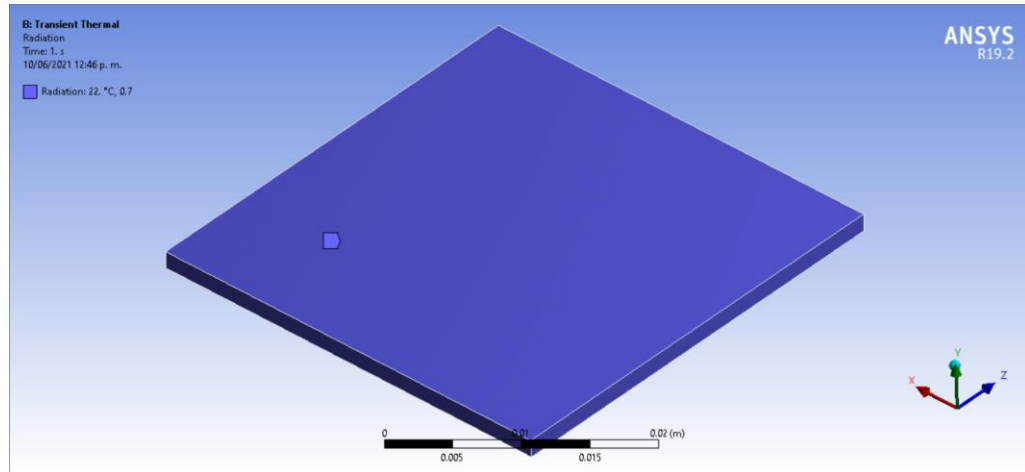


Figura 4.3.3 Aplicación de la condición de radiación en la superficie del PCB.

Adicional a la irradiancia perdida por radiación, la PCB cede calor a los alrededores al incrementar su temperatura por el fenómeno de convección libre cuando está inmersa en una atmósfera ya sea de aire o nitrógeno, para este estudio se considera el calor perdido por convección en una atmosfera de aire. En la figura 4.3.4 se muestra la condición de frontera aplicada utilizando un coeficiente de convección libre de un gas de $12 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ (agregar ref)

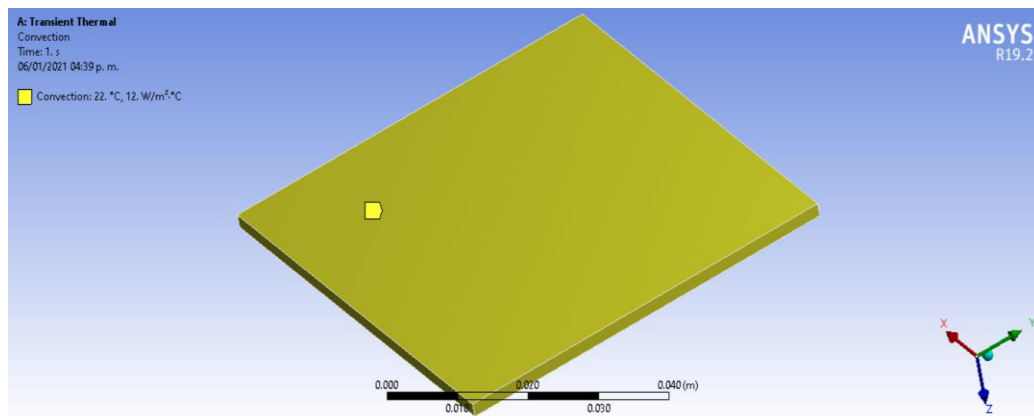


Figura 4.3.4 Condición de convección libre aplicada en la superficie.

Finalmente se establece la resolución del estudio aplicando un mallado al modelo de la PCB, por su geometría simple, este estudio no requiere de una malla fina para obtener un resultado

preciso, al aumentar la cantidad de elementos se observa que los resultados convergen rápidamente, lo que hace innecesario estudios con una gran cantidad de elementos de malla. En la figura 4.3.5 se muestra la malla establecida para la primera aproximación del experimento con 1728 nodos y 225 elementos.

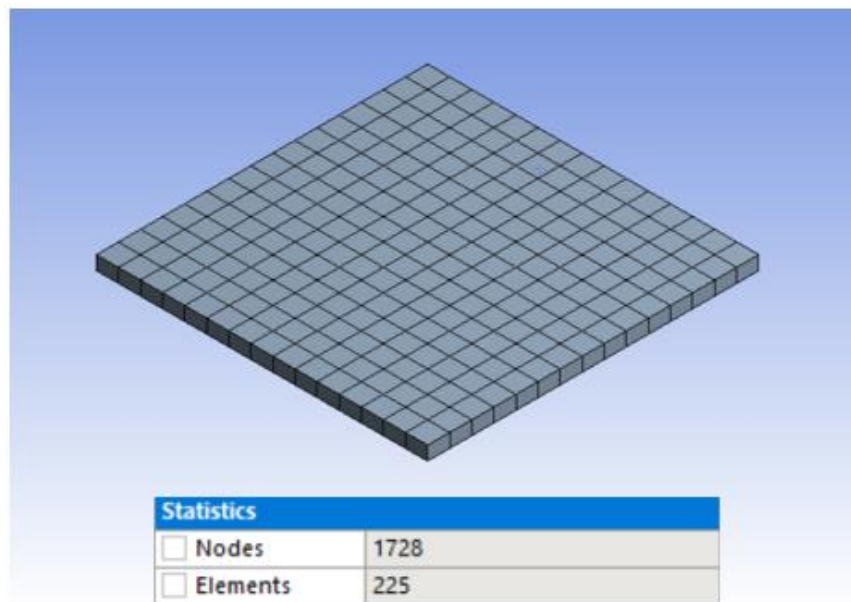


Figura 4.3.5 Mallado de la superficie para el análisis de elementos finitos.

La primera prueba consta de la aplicación de las condiciones de frontera descritas anteriormente durante un lapso de 60 segundos partiendo de una temperatura ambiente de 22°C, en la figura 4.3.6 se muestran los resultados obtenidos con el primer mallado descrito en la figura 4.3.5, se observa que la temperatura alcanzada en la zona central es de 254.29°C y en los alrededores se obtienen temperaturas relativamente uniformes, las temperaturas alcanzadas en esta superficie son suficientes para lograr el reflujo de la mayoría de las aleaciones.

En la grafica de la figura 4.3.7 y 4.3.9 y 4.3.11 se observa que las temperaturas tienden a estabilizarse con el aumento del tiempo de exposición pues se alcanza un punto de equilibrio

entre la radiación recibida por la PCB y los procesos que generan pérdida de calor hacia el ambiente, se asume que cuando el tiempo tiende a infinito la temperatura alcanzada al PCB se estabiliza alrededor de 260°C para esta configuración de condiciones de frontera y mallado.

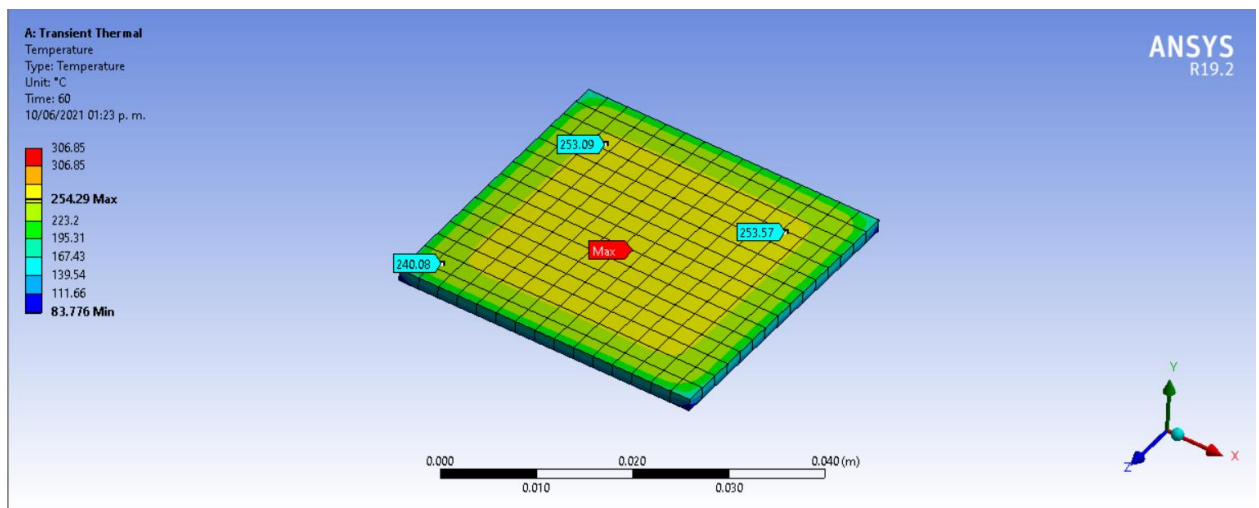


Figura 4.3.6 Resultados después de 60 segundos de exposición a la irradiancia.

En la figura 4.3.7 se muestra la grafica de la temperatura con respecto al tiempo de exposición, la línea verde corresponde a la temperatura máxima en cada instante de tiempo, esta temperatura se localiza en la zona central de la cara del PCB expuesta a la radiación, las temperaturas mínimas de la línea roja se localizan en la cara opuesta a la zona expuesta, la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas depende directamente de la conductividad térmica del material estudiado, en materiales con alta conductividad térmica como la mayoría de los metales se obtienen diferencias de temperatura significativamente menores.

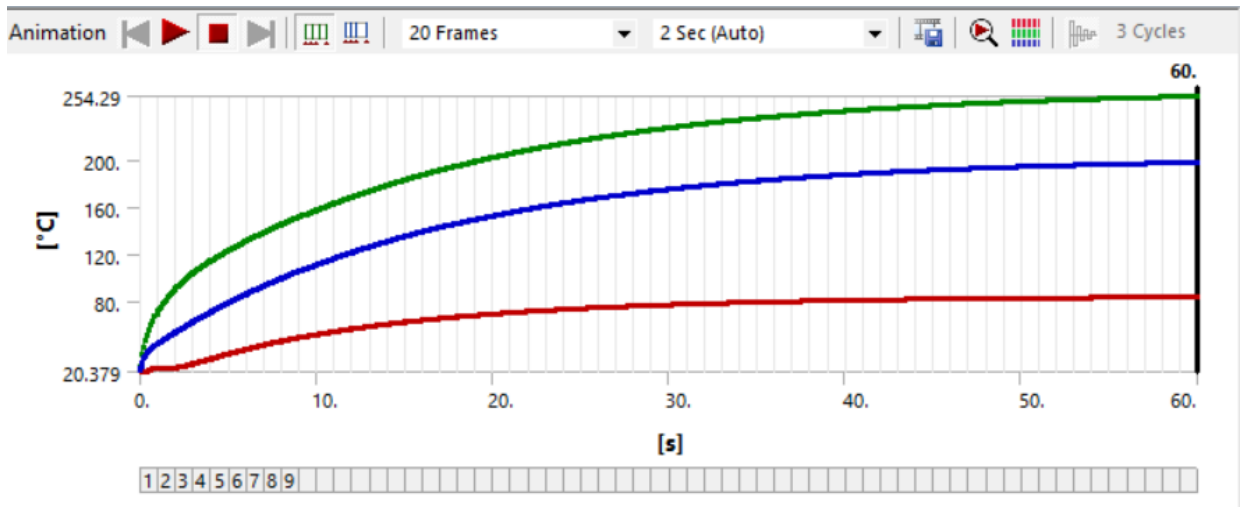


Figura 4.3.7 Gráfica de temperaturas promedio, máximas y mínimas para una exposición de 60 segundos.

Cuando el tiempo de exposición se incrementa a 120 segundos se obtienen una temperatura máxima de 259.9 °C, apenas 5°C superior a la obtenida con una exposición de 60 segundos. Los tiempos de reflujó típicos recomendados para algunas aleaciones de soldadura alcanzan hasta los 300 segundos.

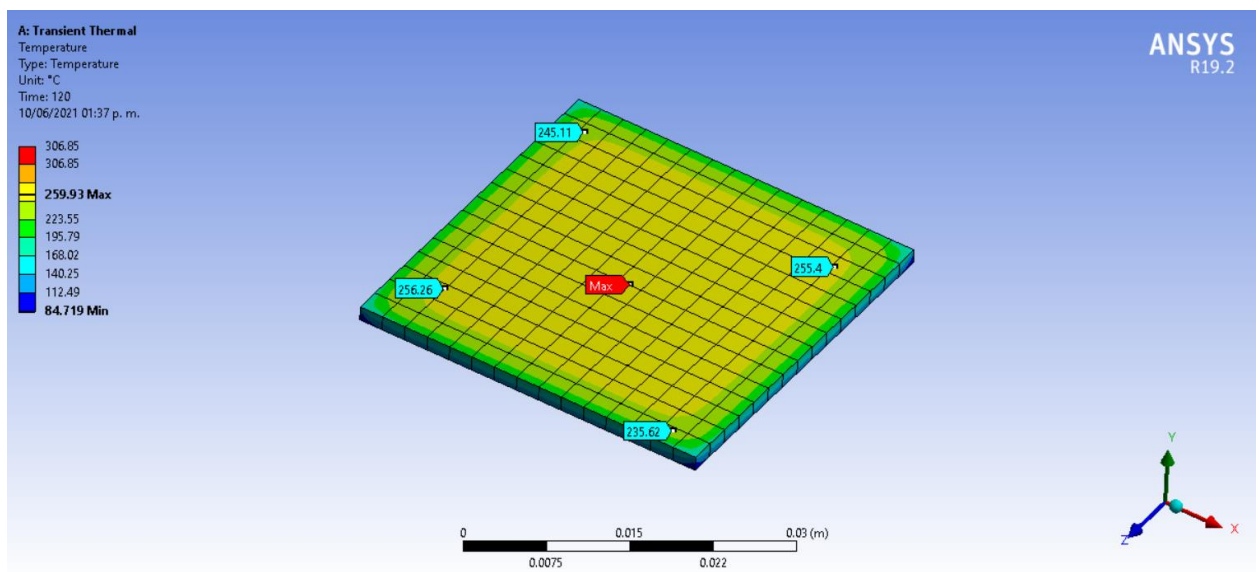
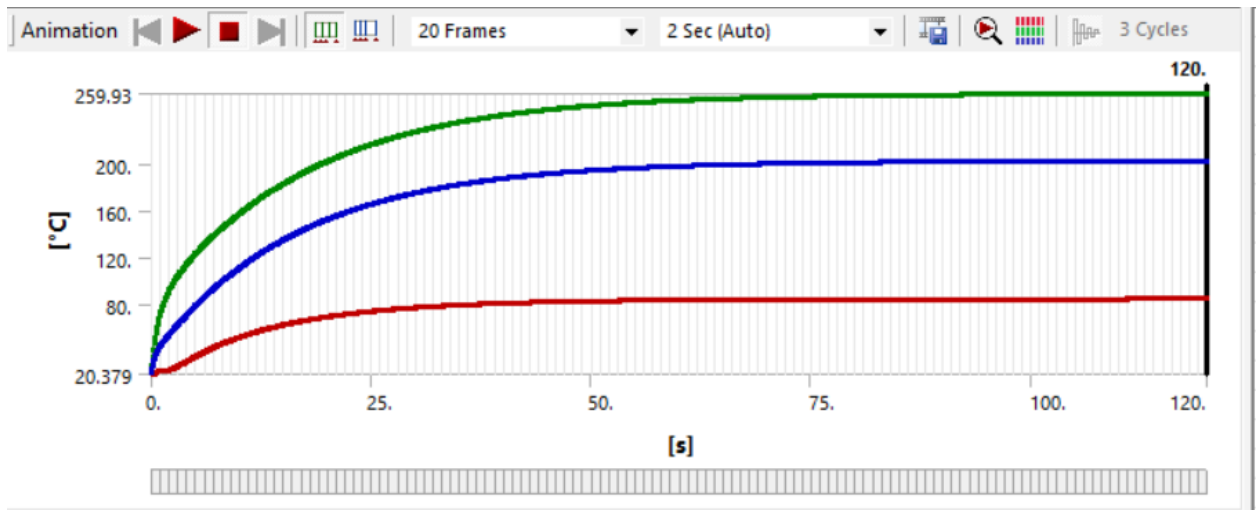


Figura 4.3.8 Resultados con un tiempo de exposición de 120 segundos.



4.3.9 Gráficas de temperaturas promedio, máximas y mínimas para una exposición de 120 segundos.

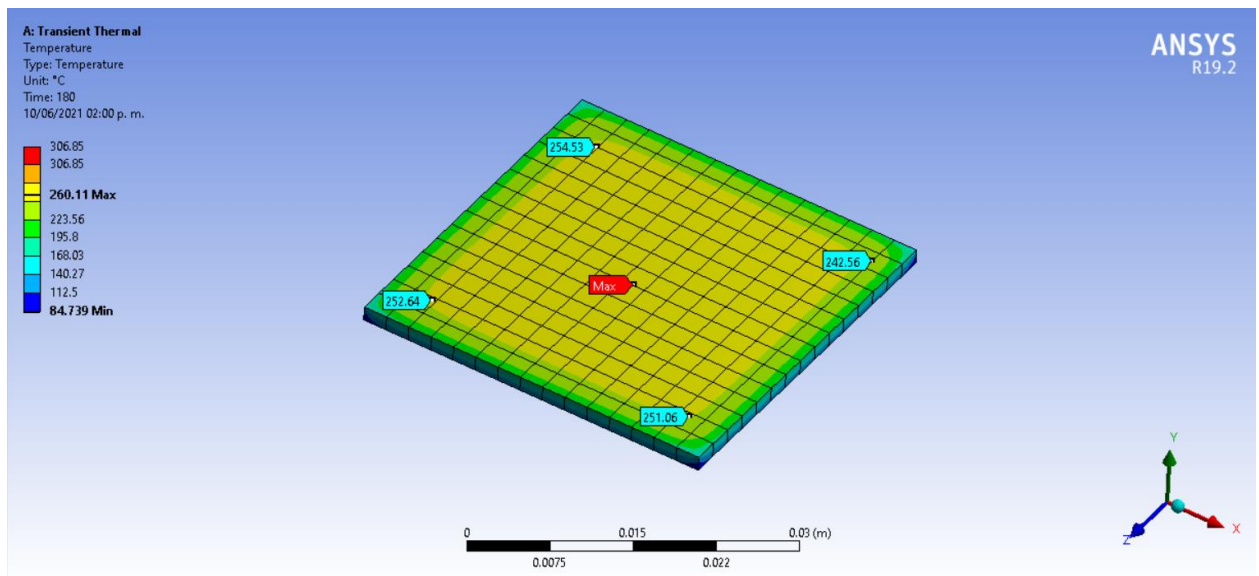


Figura 4.3.10 Resultados con un tiempo de exposición de 180 segundos.

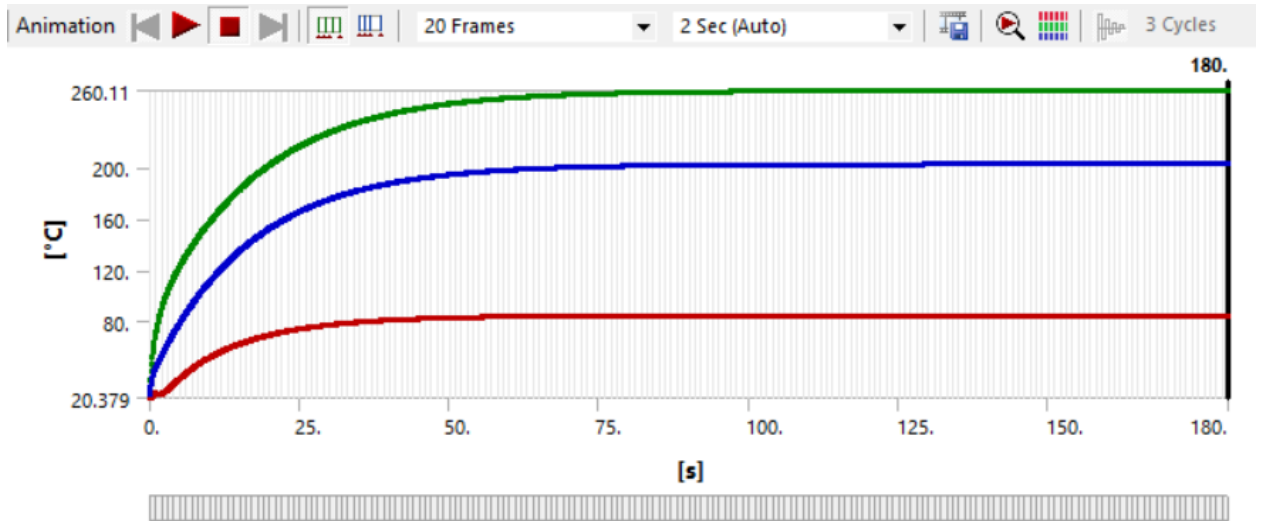


Figura 4.3.11 Gráficas de temperaturas promedio, máximas y mínimas para una exposición de 180 segundos.

Al incrementar la cantidad de nodos y elementos en el estudio se obtienen resultados con diferencias poco significativas, esto debido a la geometría simple del modelo, en la figura 4.3.12 se muestran las características del mallado utilizado y en la figura 4.3.13 se muestra el resultado.

Al no existir diferencias significativas, en los futuros estudios con la misma configuración se utilizará el mallado de la figura 4.3.5 para reducir los tiempos de cálculo de las simulaciones.

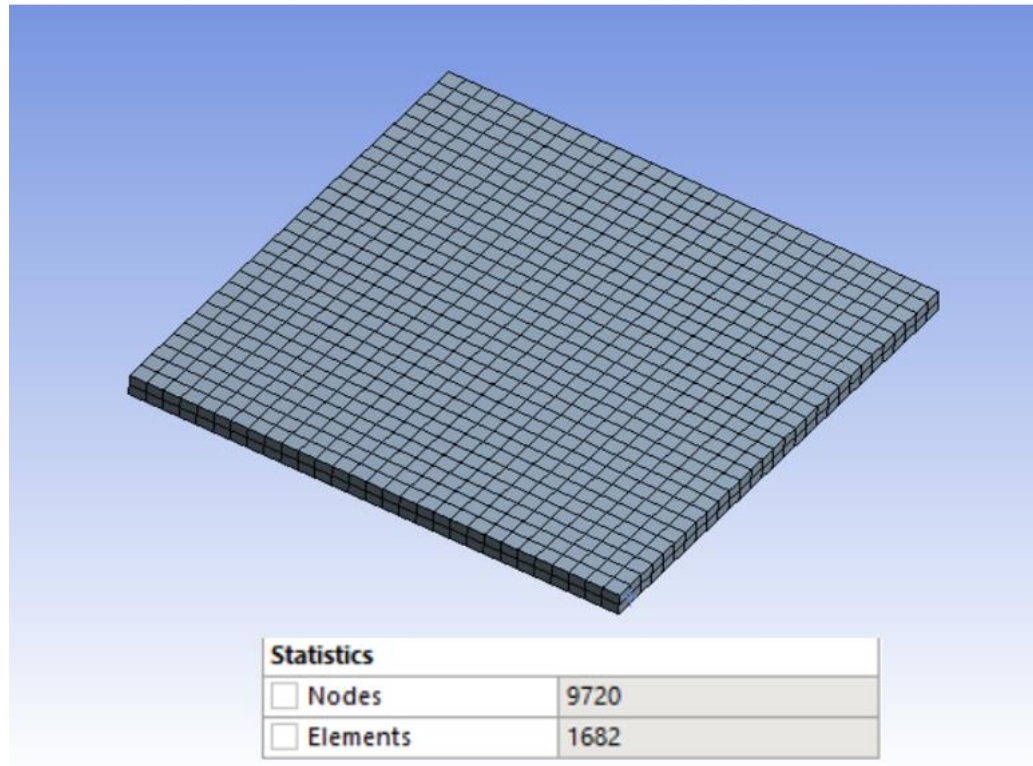


Figura 4.3.12 Mallado fino de la superficie para el análisis de elementos finitos.

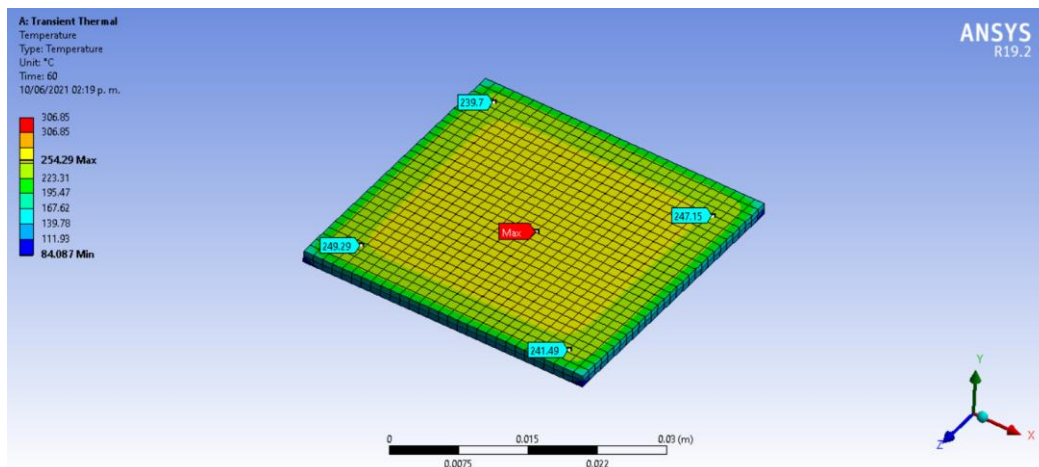


Figura 4.3.13 Resultados después de un tiempo de exposición de 60 segundos con un mallado fino.

Con los resultados del análisis térmico en estado transitorio por el método de elementos finitos se concluye que el arreglo matricial de fuentes infrarrojas irradiando a 10mm de

distancia en una superficie de 36mm x 36mm de material FR-4 Epoxy logra alcanzar temperaturas de hasta 260°C en la cara expuesta a la radiación.

4.4 Aplicación de irradiancia por zonas.

El objetivo del sistema planteado es lograr que distintas zonas de un PCB alcancen las temperaturas de reflujo para las soldaduras presentes en ellas, para esto podemos manipular el encendido y apagado de los LED para modificar la irradiancia recibida por la superficie del PCB.

Se realizó un análisis con distintas configuraciones de encendido y apagado en la matriz de LEDs para observar la irradiancia resultante en la superficie del PCB, posteriormente se hizo un análisis de elementos finitos utilizando las irradiancias obtenidas para obtener las temperaturas alcanzadas en las zonas creadas en la superficie.

La primera configuración estudiada se muestra en la figura 4.4.1, se apagaron los 4 LEDs de la zona central de la matriz, en color rojo se muestran los LED que permanecen encendidos y en color naranja los que fueron apagados.

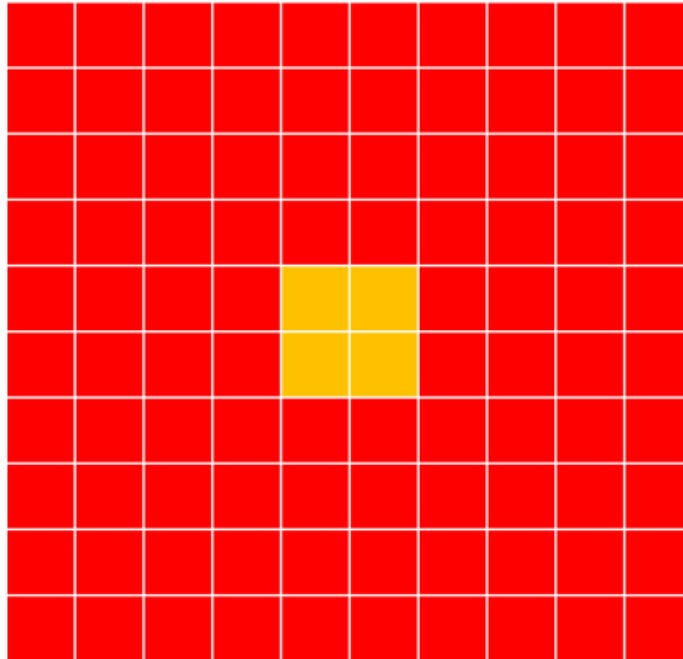


Figura 4.4.1 Configuración de 4 LED apagados al centro.

Se simuló la irradiancia producida por la matriz de LEDs con la configuración de la figura 4.4.1 sobre una superficie a 10mm de distancia normal, se producen 3 zonas principales (zona central, zona media y zona exterior) señaladas en la figura 4.4.2, la zona central tiene una dimensión de 12mm x 12mm y recibe una irradiancia promedio de $2.9 \frac{W}{cm^2}$, la zona media tiene una dimensión de 24mm x 24mm y recibe una irradiancia promedio de $3.75 \frac{W}{cm^2}$, finalmente la zona externa recibe una irradiancia promedio de $2.08 \frac{W}{cm^2}$, con estos valores de irradiancia se realizó un análisis de elementos finitos para conocer las temperaturas alcanzadas en las zonas delimitadas.

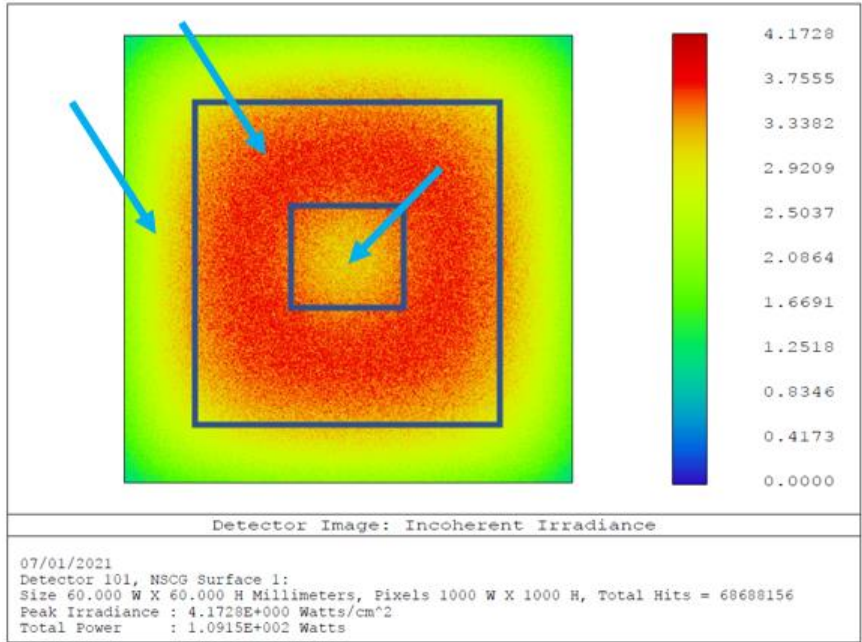


Figura 4.4.2 Zonas de irradiancia creadas por la configuración de la matriz.

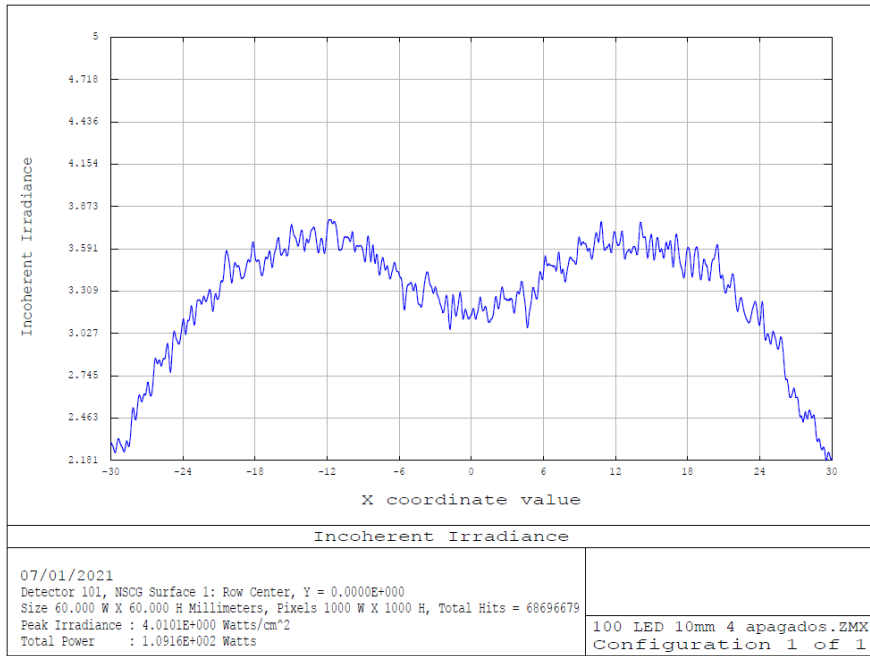


Figura 4.4.3 Corte transversal de la irradiancia sobre la superficie.

Después de una exposición de 60 segundos bajo las condiciones de frontera planteadas en la sección 4.3 y la distribución de irradiancia de la figura 4.4.2 se obtienen zonas claramente diferenciadas de temperatura, con este resultado se espera lograr el control de temperatura en zonas con una superficie mínima de 12mm x 12mm.

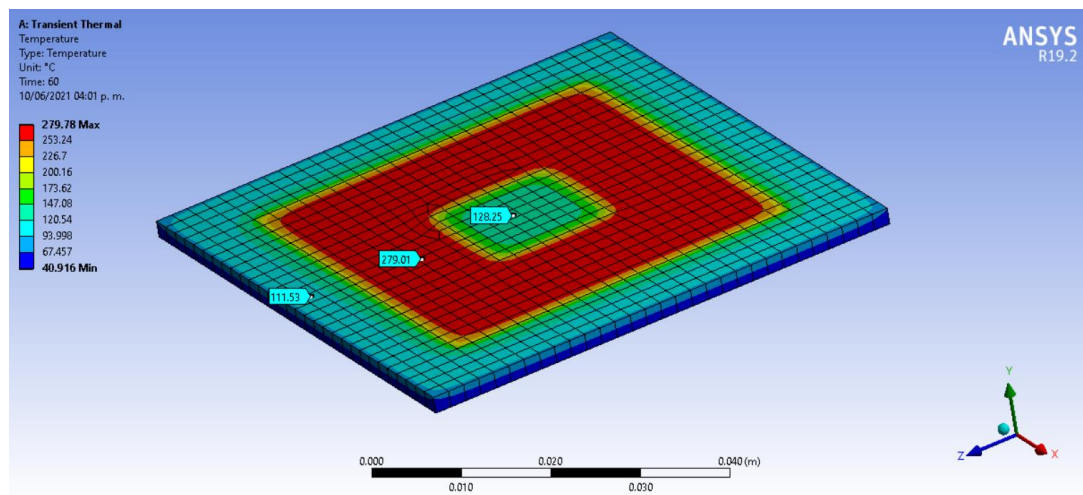


Figura 4.4.4 Temperatura alcanzada después de una exposición de 60 segundos.

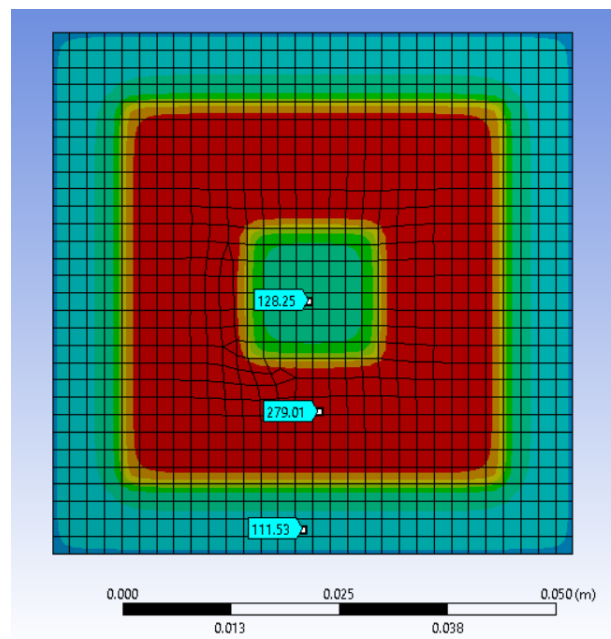


Figura 4.4.5 Zonas de temperatura obtenidas en el PCB

Se muestran distintas configuraciones de encendido de la matriz y la correspondiente irradiancia sobre la superficie del PCB, las configuraciones solo contemplan el encendido o apagado de las fuentes infrarrojas, sin embargo es posible operar dentro del rango de irradiancia de cada LED utilizando una modulación por ancho de pulsos, los resultados que se muestran se obtienen con la mayor irradiancia que pueden emitir los LED y los contrastes de temperatura alcanzados en las zonas delimitadas corresponden a la máxima diferencia de temperatura que se puede alcanzar, teóricamente cualquier resultado intermedio puede ser logrado aplicando la potencia adecuada a cada elemento de la matriz.

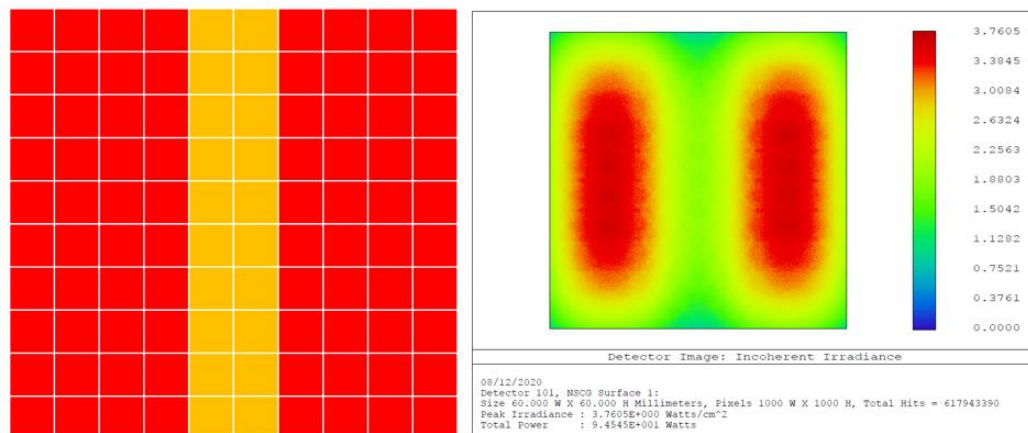


Figura 4.4.5 Configuración de la matriz de LED con dos franjas verticales apagadas.

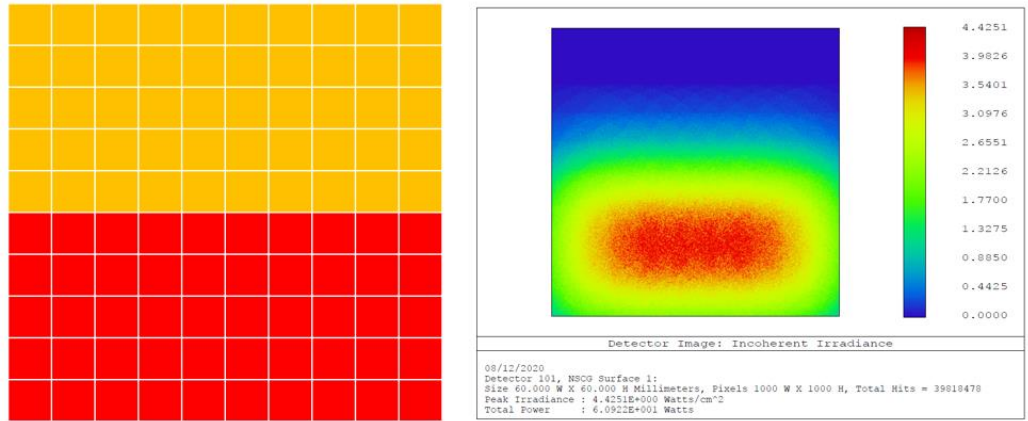


Figura 4.4.6 Configuración de la matriz de LED con la mitad superior apagada.

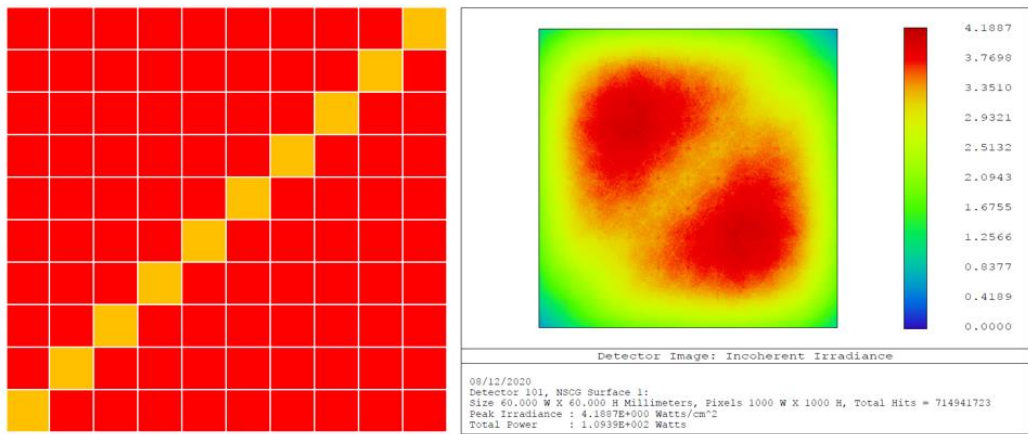


Figura 4.4.7 Configuración de la matriz de LED con una diagonal de LED apagada.

4.5 Distancia de trabajo de la matriz de LEDs

Los resultados obtenidos en los análisis de transferencia de calor y de distribución de irradiancia muestran que el arreglo matricial de LED SFH 4716 AS propuesto logra alcanzar temperaturas de reflujo en la superficie de un PCB de FR-4 Epoxy cuando este se coloca a 10mm de distancia normal.

El rango de temperatura de operación de los LED SFH 4716 AS y SFH 4726 AS es de -40°C a 125°C , para la configuración mostrada en la figura 4.2.2 la matriz de LED se localiza a una distancia normal de 10mm de la superficie del PCB, las pérdidas de calor por radiación y por convección en el PCB durante el proceso de soldadura pueden incrementar la temperatura de los LED y llevarla fuera del rango de operación, esto modifica la máxima potencia irradiada en operación continua y la vida útil del dispositivo.

Con el calor cedido al ambiente por el PCB por los fenómenos de convección y radiación cuando este se encuentra a temperaturas cercanas a 260°C , el LED puede alcanzar temperaturas de hasta 205.94°C como se muestra en la figura 4.5.1 este valor está fuera del rango de operación por lo que es necesario alejar la matriz.

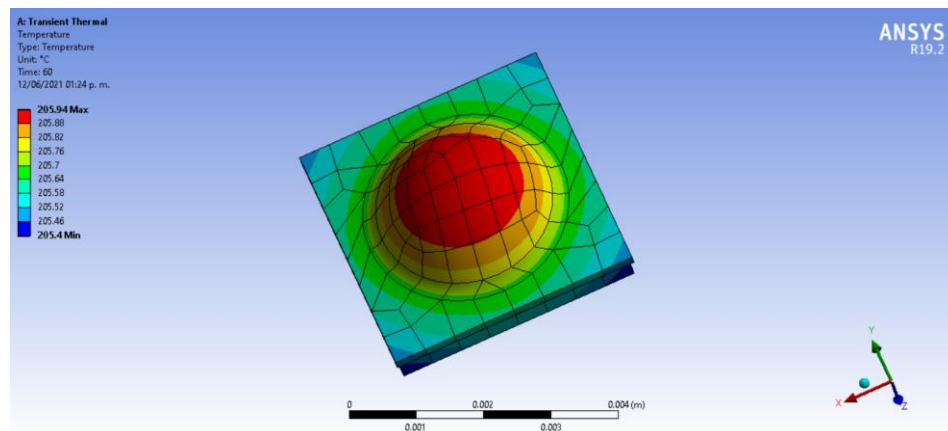


Figura 4.5.1 Temperatura del LED.

Al colocar la matriz con la configuración de la figura 4.5.2 a una distancia de 60mm se obtiene la distribución de irradiancia de la figura 4.5.3.

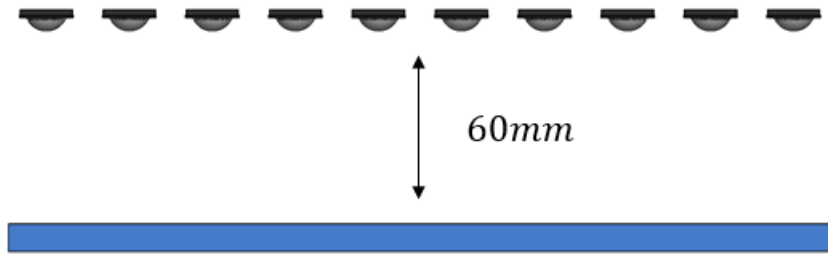


Figura 4.5.2 Configuración a 60mm de distancia normal

La eficiencia obtenida con esta configuración es del 26.56%, esta distribución de irradiancia no es suficiente para alcanzar las temperaturas de reflujo requeridas en el PCB, además al apagar los 4 LED centrales no se aprecia una diferencia significativa de temperaturas en la zona central del PCB por lo que la función de controlar la temperatura en zonas específicas queda reducida, en la figura 4.5.4 se muestra la distribución de irradiancia con esta con

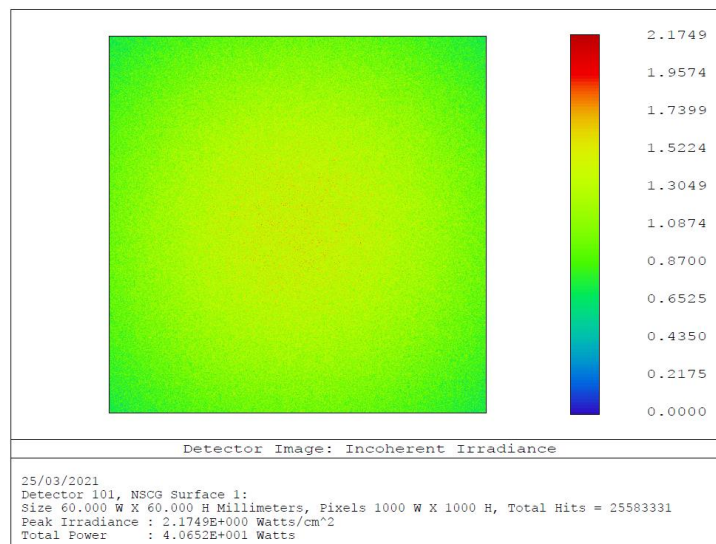


Figura 4.5.3 Distribución de irradiancia con una eficiencia del 26.56%.

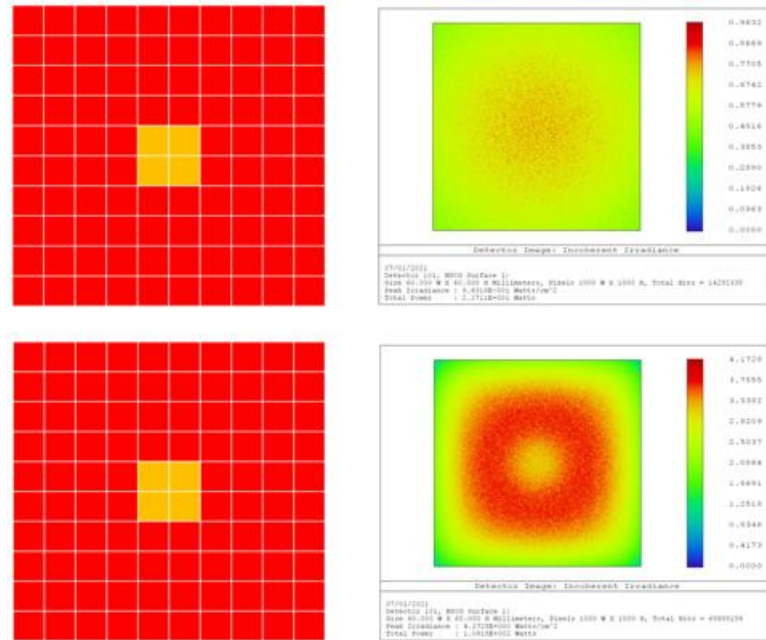


Figura 4.5.4 Comparativa de la diferencia de irradiancia a 60mm y a 10mm respectivamente.

4.6 Ángulo de emisión del LED

Una característica importante de las fuentes emisoras de radiación LED es su ángulo de emisión α , este determina la superficie alcanzada por el flujo radiante, la potencia total irradiada se distribuye en el cono generado por este ángulo. En la figura 4.5.1 se muestra el ángulo α , para los LED SFH 4716 AS y SFH 4726 AS tiene un valor de 150° . La figura 4.5.2 muestra la irradiancia relativa con respecto al ángulo de emisión, para las simulaciones se considera una irradiancia constante para simplificar el análisis.

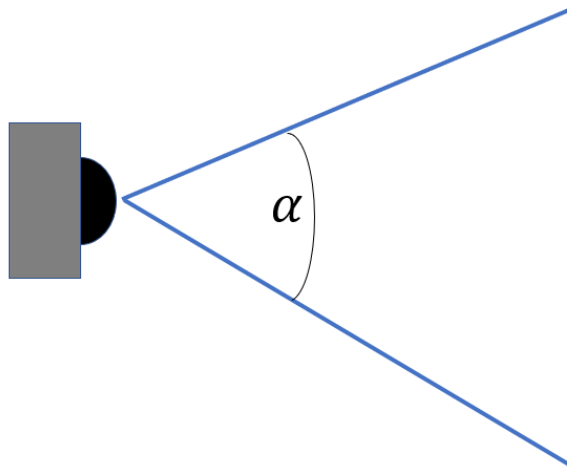


Figura 4.5.1 Ángulo de emisión α de una fuente LED.

El objetivo del sistema de soldadura propuesto es asegurar una distribución uniforme de irradiancia así como lograr el control de temperatura por zonas, el tener un ángulo de emisión α muy grande presenta inconvenientes pues de esta manera en un arreglo matricial, cada LED tendrá una contribución de irradiancia en una zona muy amplia y esto dificulta el control de temperatura por zonas.

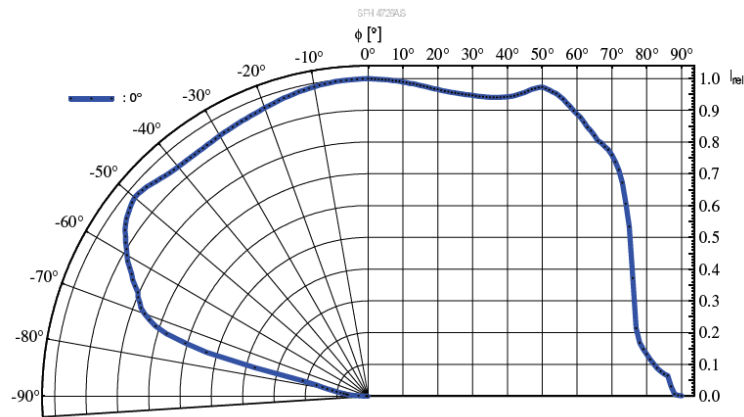


Figura 4.5.2 Ángulo de emisión de los LED SFH 4716 AS y SFH 4726 AS

(Imagen propiedad de OSRAM Opto semiconductors).

Al simular la irradiancia producida por una fuente infrarroja LED sobre una superficie plana de 60mm x 60mm que simula la superficie de un PCB a una distancia de 60mm se obtiene la distribución de la figura 4.5.3. Además de la baja eficiencia,

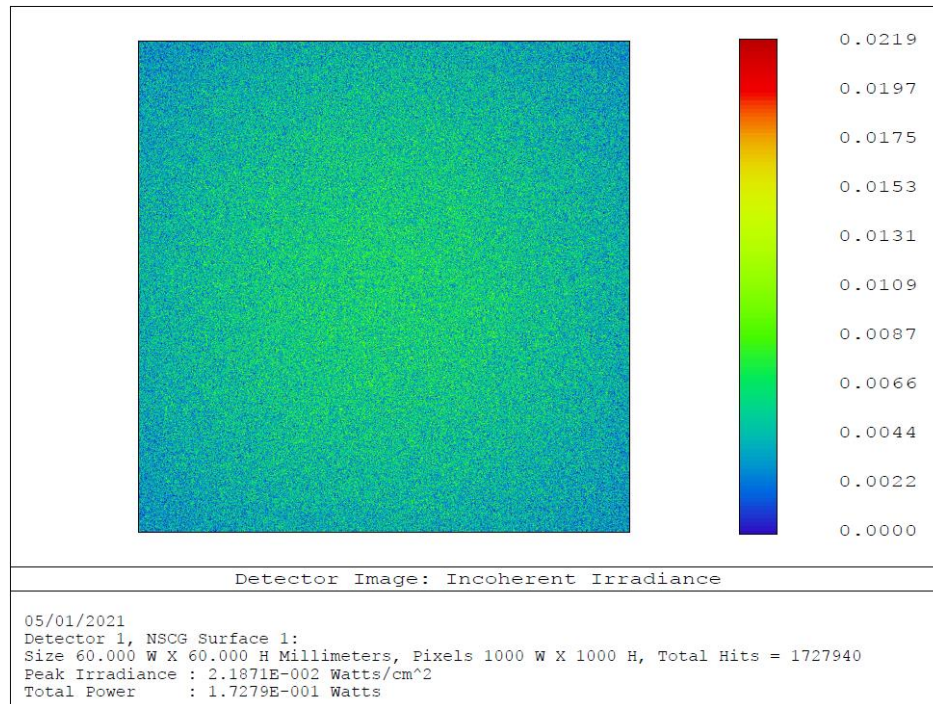


Figura 4.5.3 Irradiancia sobre la superficie producida por un LED a 60mm de distancia normal.

4.7 Reflector de secciones cónicas.

Para reducir el ángulo de emisión α del LED SFH 4716 AS se diseñó un reflector formado por secciones.

El LED irradia una zona circular de radio $r = d \tan \frac{\alpha}{2}$, cuando $d = 10mm$ el valor de radio resulta $r = 37.32 mm$

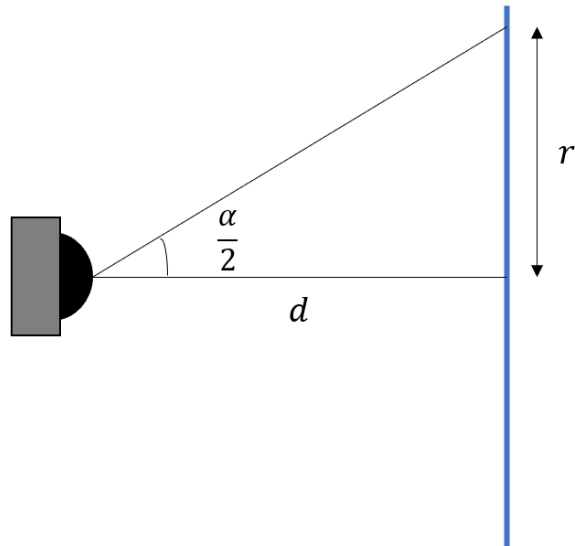


Figura 4.7.1 Cálculo del radio del área irradiada por un LED.

Para lograr la misma superficie irradiada en la configuración de 10mm de distancia con la configuración de 60 mm de distancia se utiliza el reflector de la figura 4.7.2

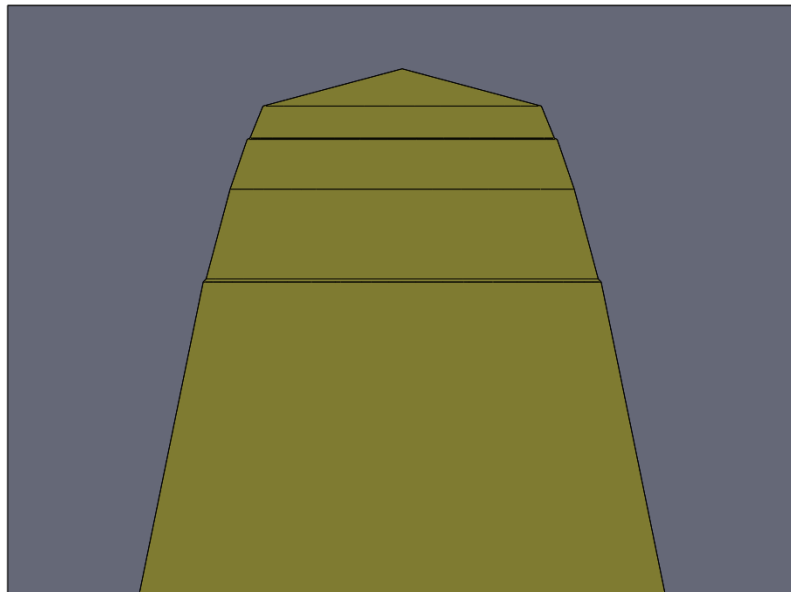


Figura 4.7.2 Reflector de superficies cónicas.

4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos durante la presente investigación se confirma la viabilidad de construir el sistema de soldadura de múltiples componentes SMD con luz infrarroja con el reflector de conductos cuadrados de entrada cónica.

Las temperaturas alcanzadas en el PCB obtenidas mediante el análisis de elementos finitos son superiores a las requeridas por la mayoría de las aleaciones de soldaduras existentes, además se logra controlar la temperatura en secciones rectangulares con dimensiones desde 12mm x 12mm.

El reflector propuesto tiene una geometría de fácil fabricación que puede ser elaborado en las instalaciones de los laboratorios de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

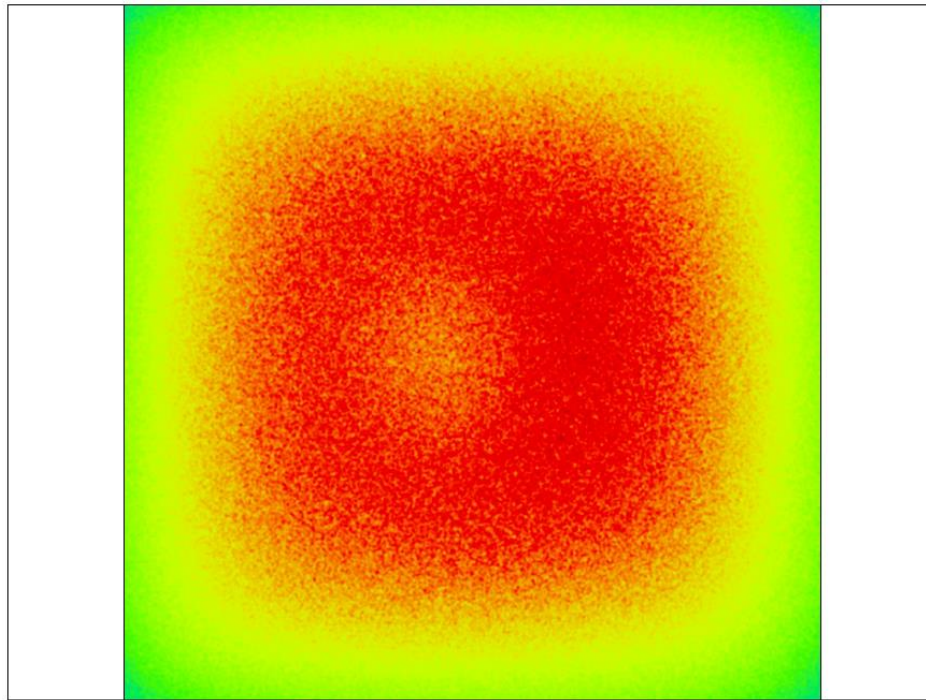
5. Trabajos futuros

A continuación se enlistan los trabajos a futuro para el desarrollo del sistema presentado en esta tesis.

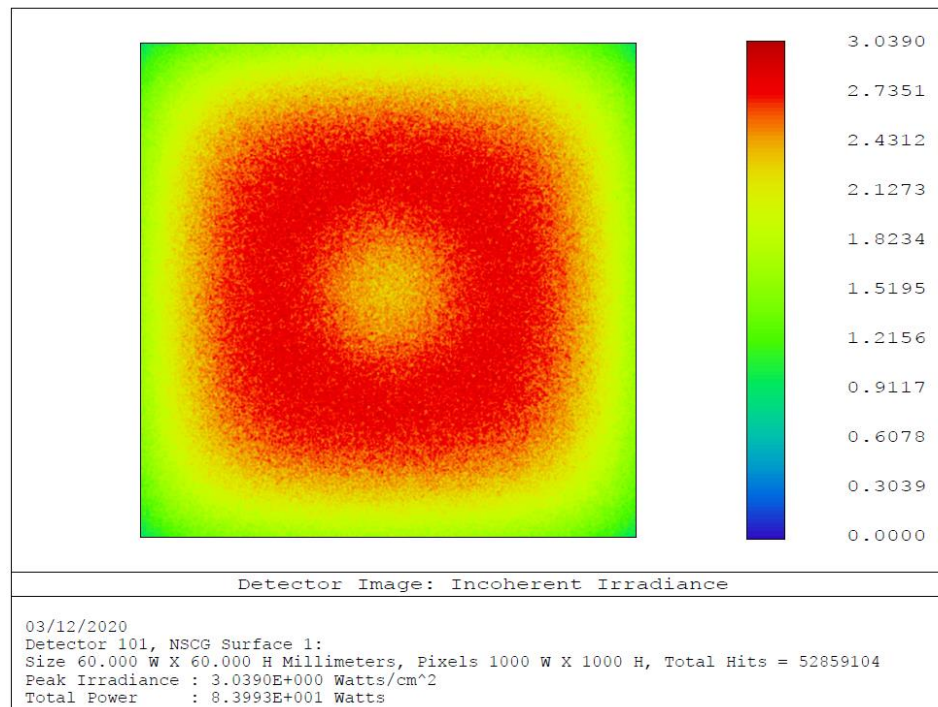
- Caracterizar los LEDs simulados para corroborar sus características ópticas.
- Realizar las mediciones de irradiancia de los LED.
- Fabricar el reflector y realizar pruebas de conducción de irradiancia y capacidades de disipación de calor.
- Implementar un sistema de control para la matriz de LEDs.

6. Anexos

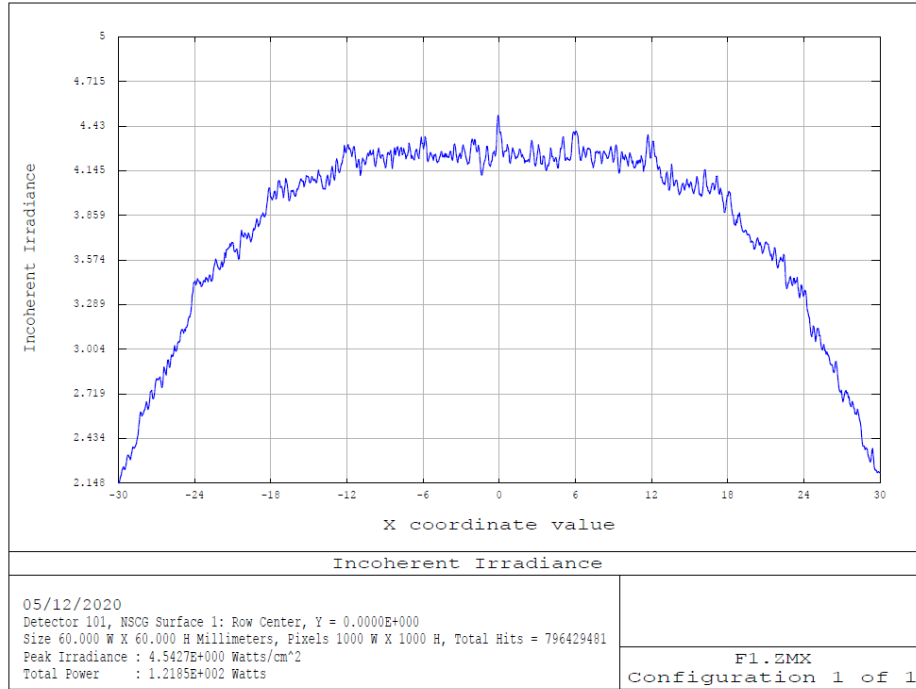
Capturas realizadas de los resultados obtenidos en Zemax.



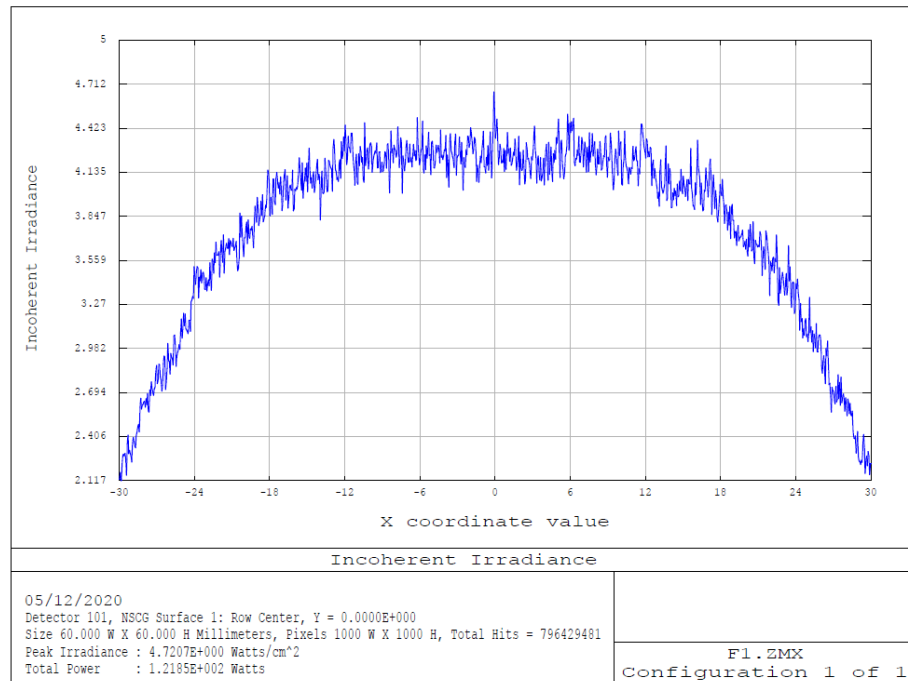
Irradiancia con 2 LEDs apagados en el centro.



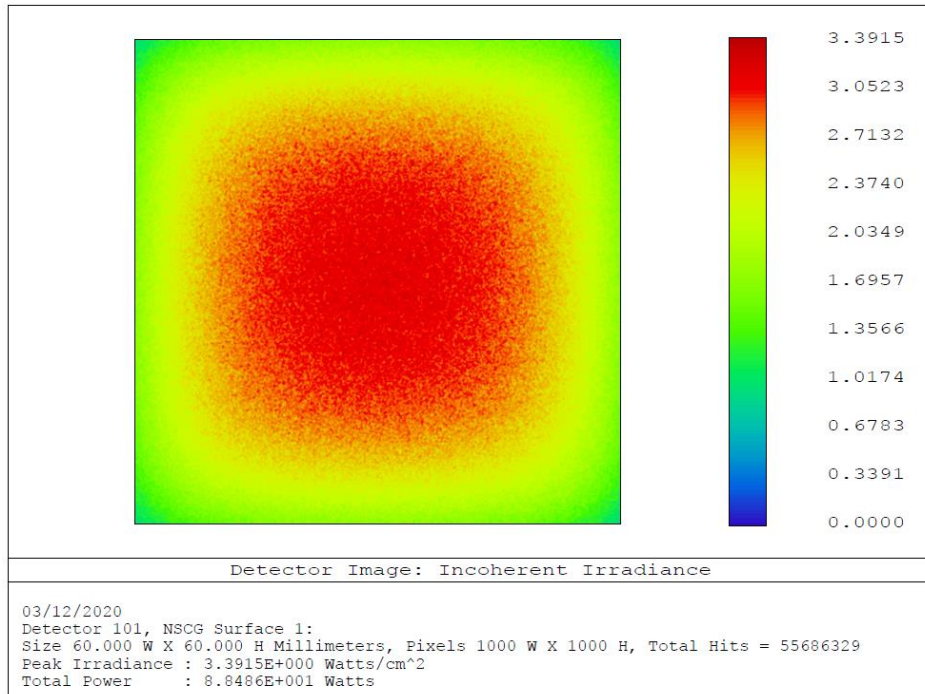
Irradiancia con 4 LEDs apagados en el centro.



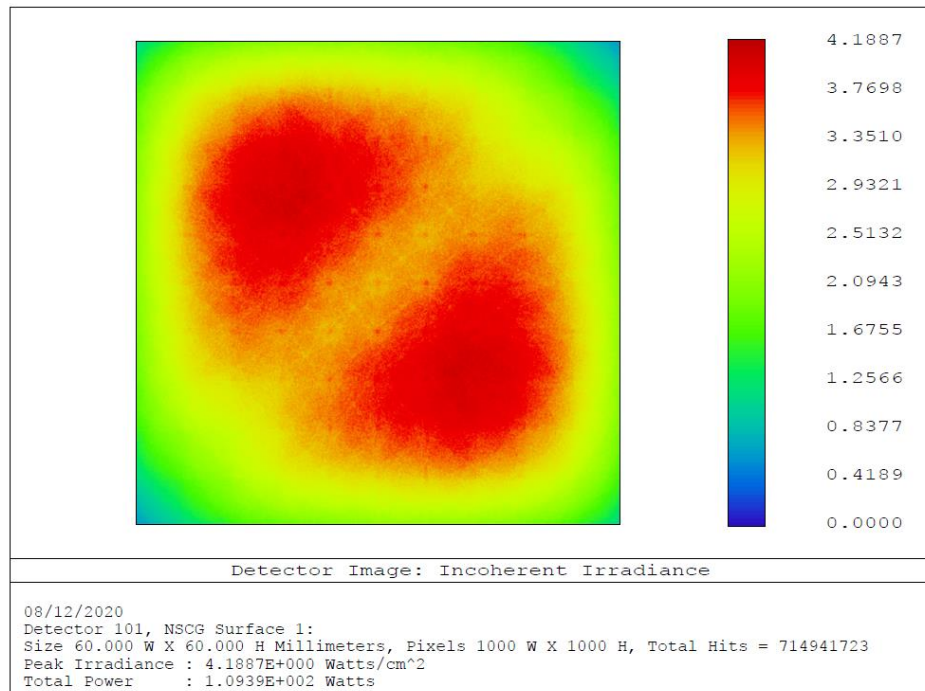
Irradiancia de una sección transversal de la PCB con todos los LEDs encendidos.



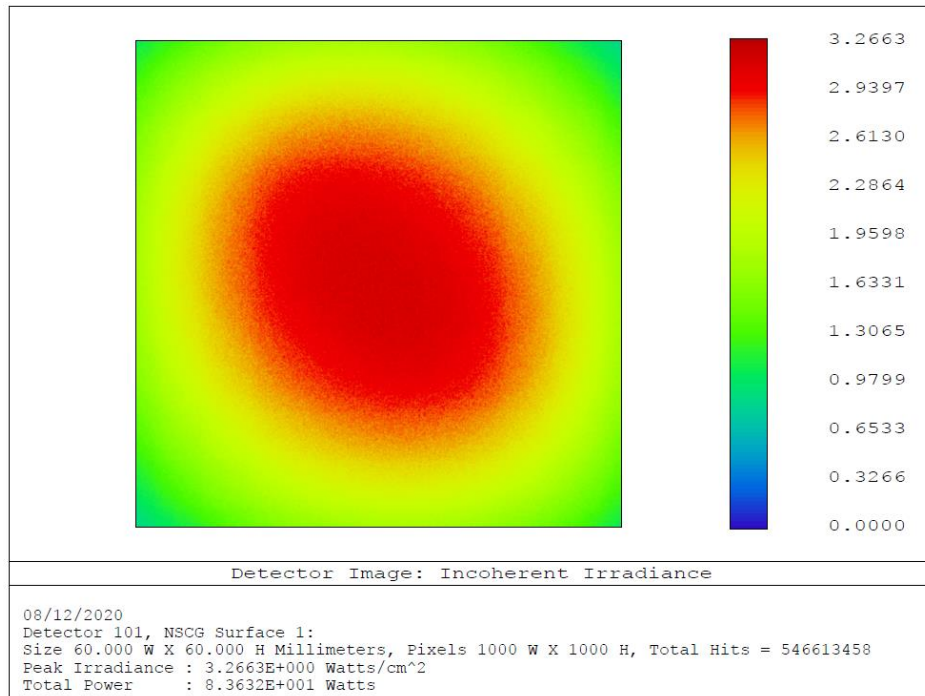
Irradiancia de una sección transversal de la PCB con todos los LEDs encendidos sin suavizado.



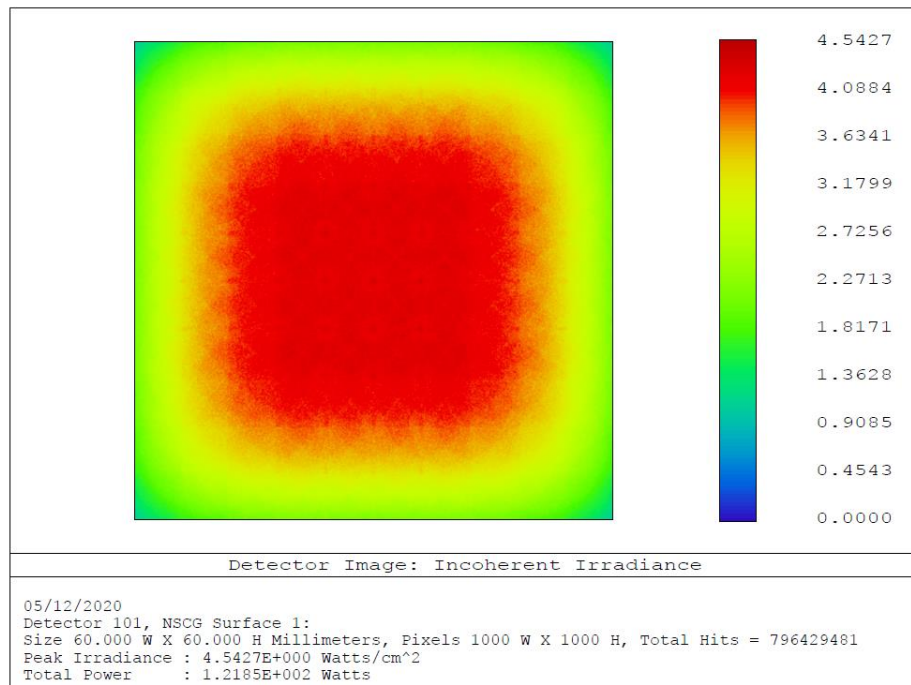
Irradiancia con todos los LEDs encendidos a 10 mm de distancia.



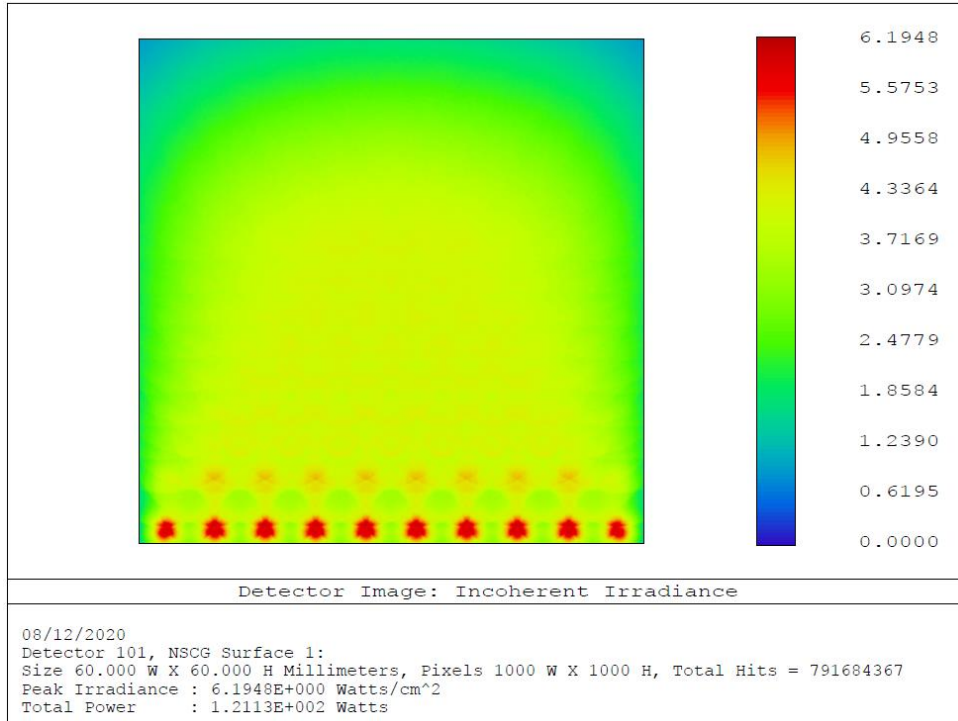
Irradiancia con una línea diagonal de LEDs apagados.



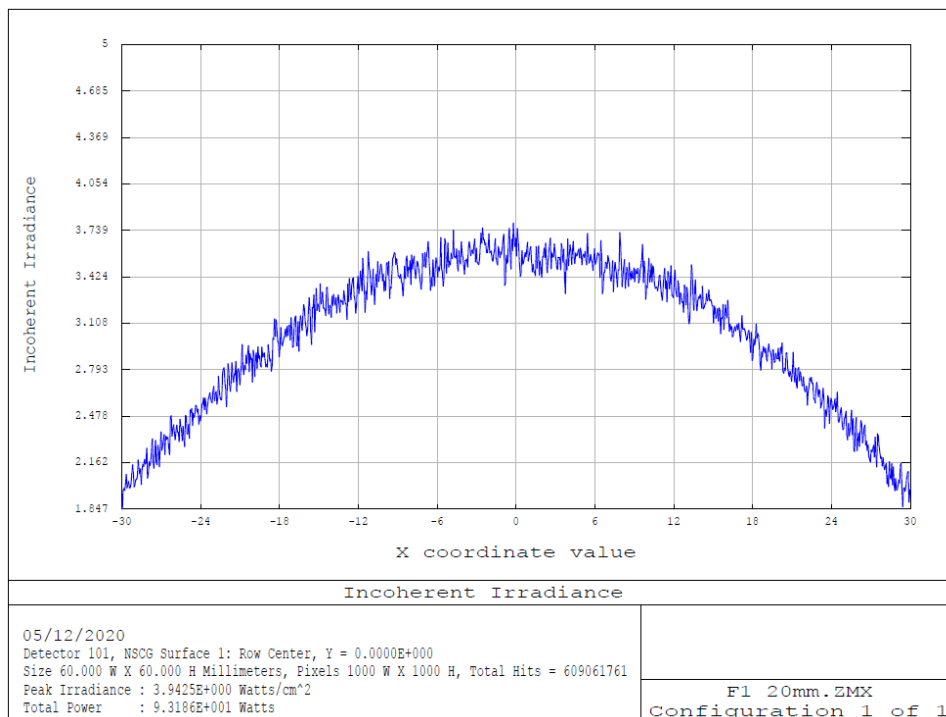
Irradiancia con una diganoal de LEDs apagados a 60mm de distancia.



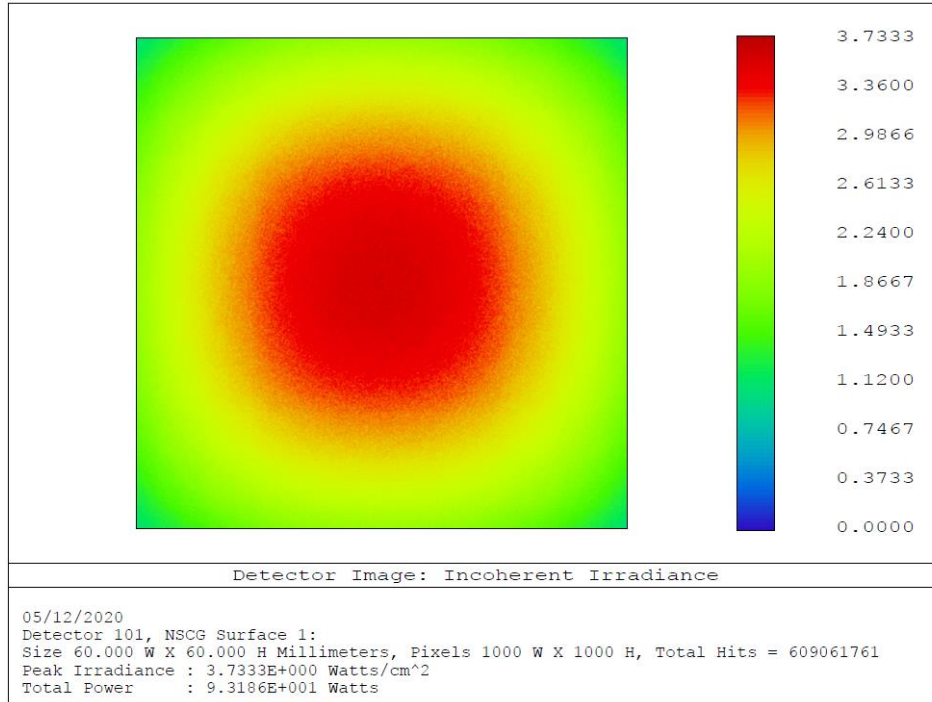
Irradiancia con una inclinación de 0 grados respecto a la normal.



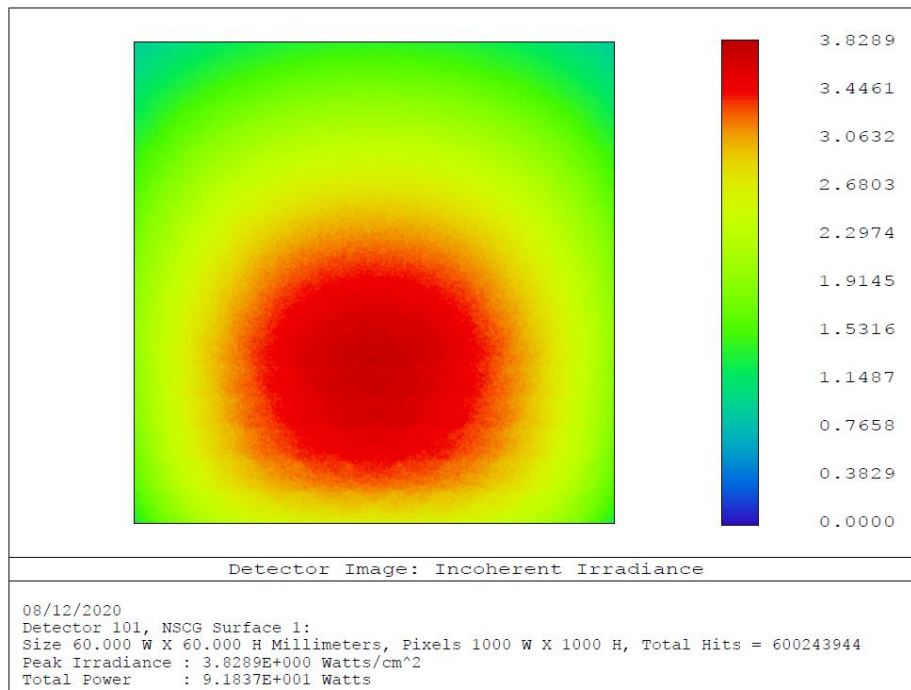
Irradiancia con una inclinación de 15 grados con respecto a la normal.



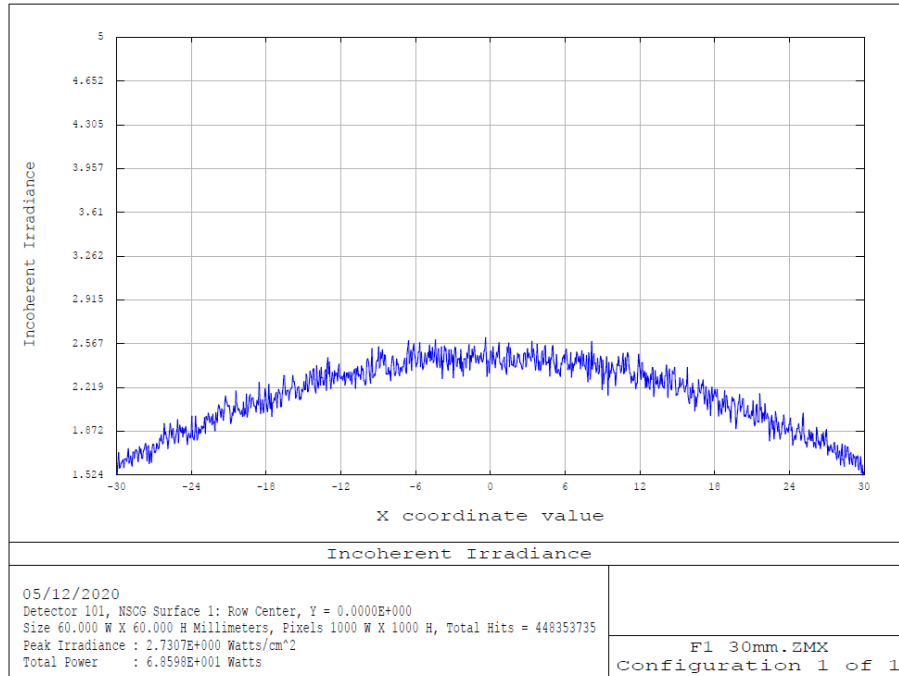
Irradiancia a 20mm de distancia.



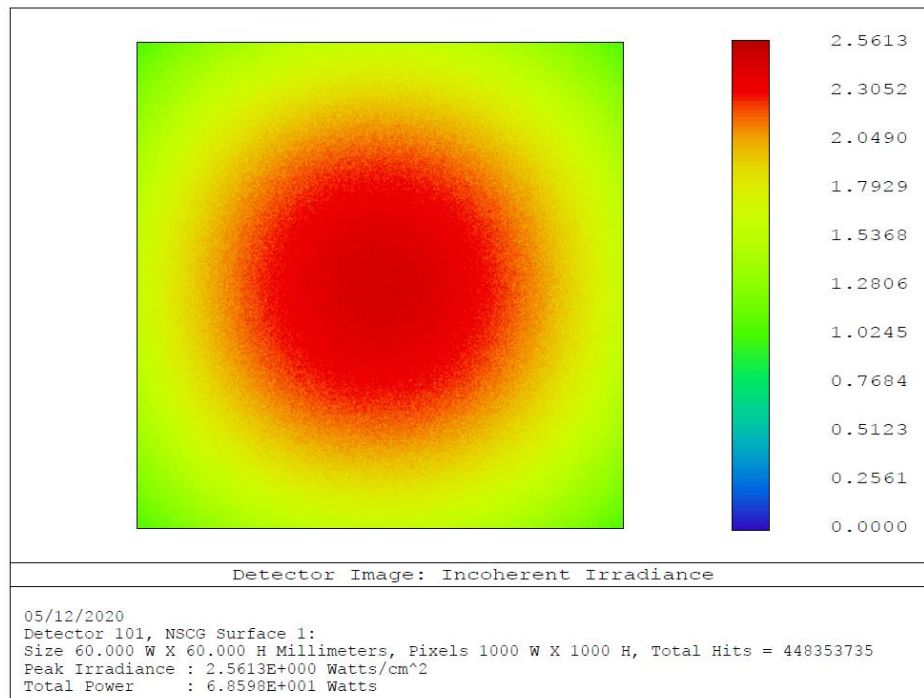
Irradiancia a 20mm de distancia sin inclinación.



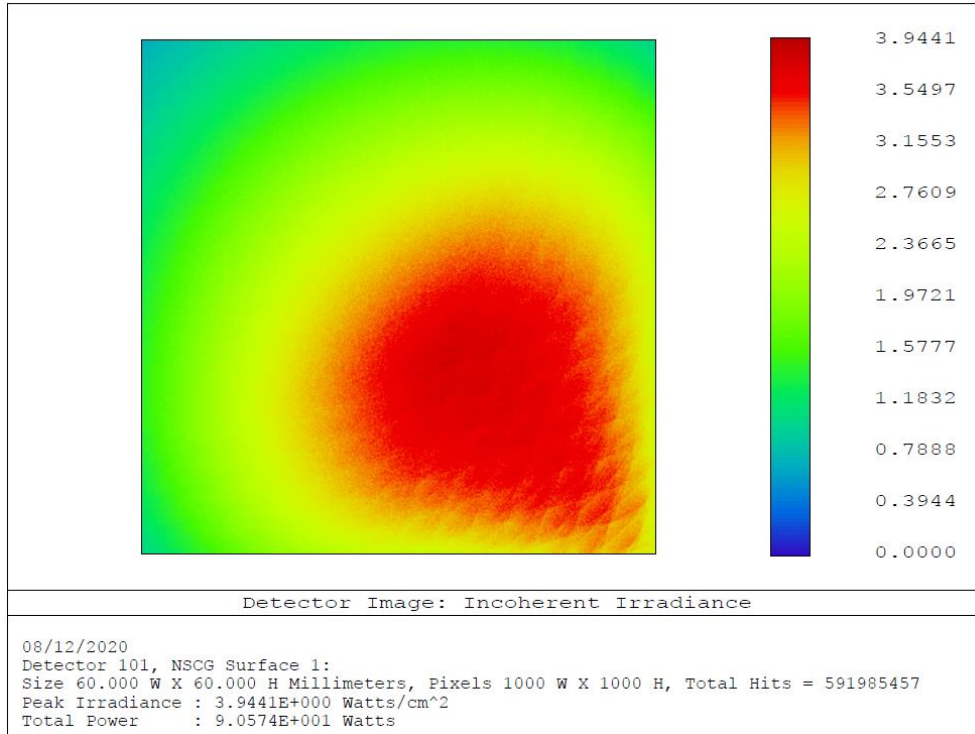
Irradiancia a 20mm de distancia con una inclinación de 15 grados.



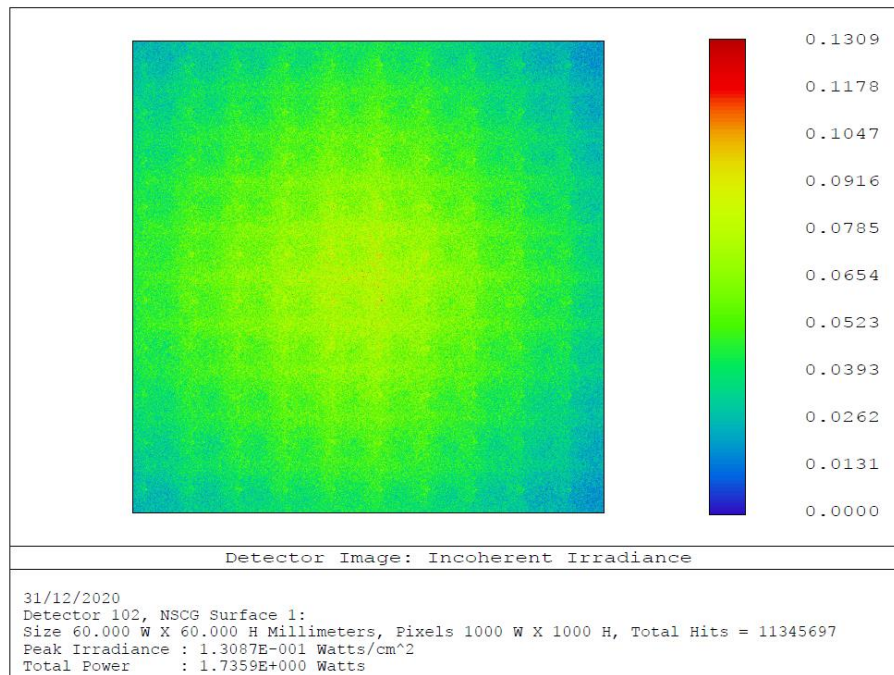
Irradiancia a 30mm de distancia.



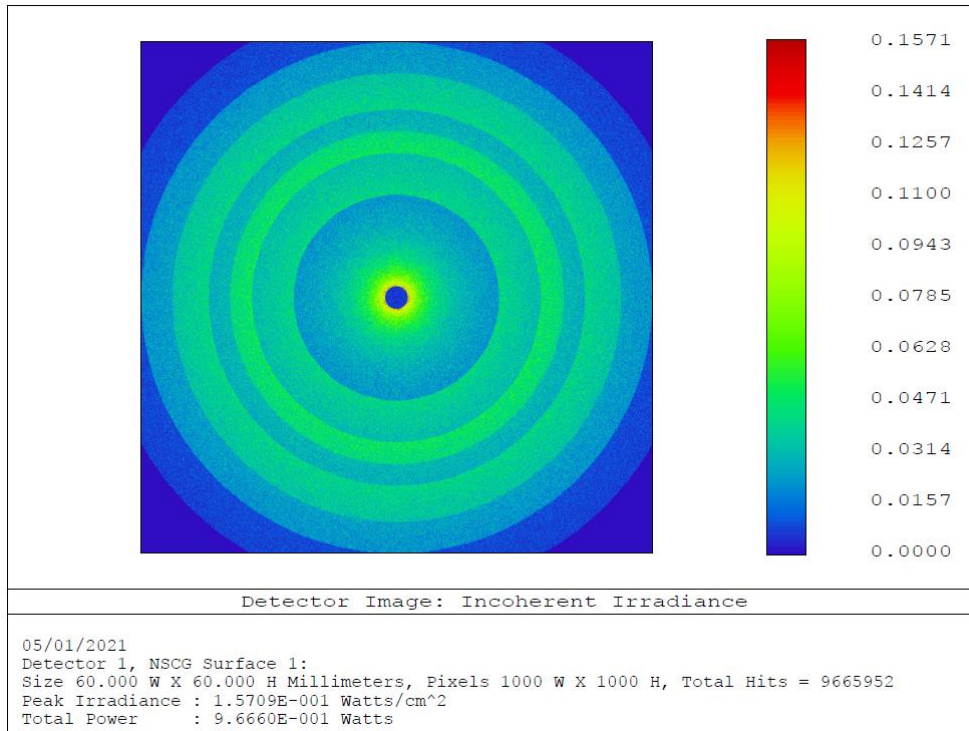
Irradiancia a 30 mm de distancia sin inclinación.



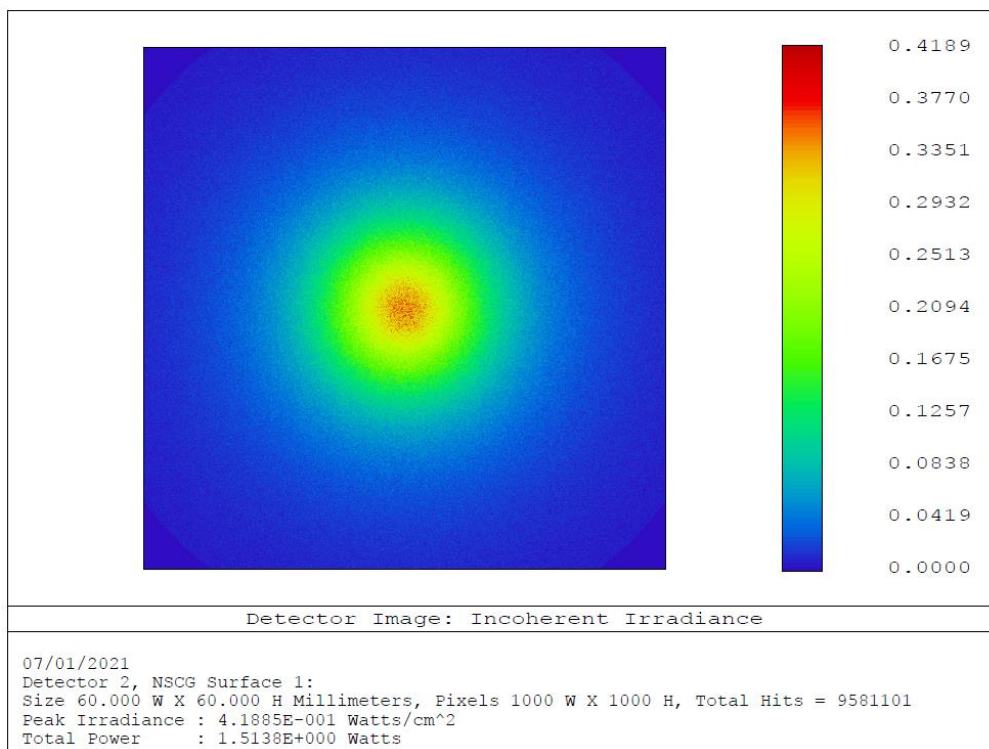
Irradiancia a 30mm de distancia con inclinación de 15 grados en 2 ejes.



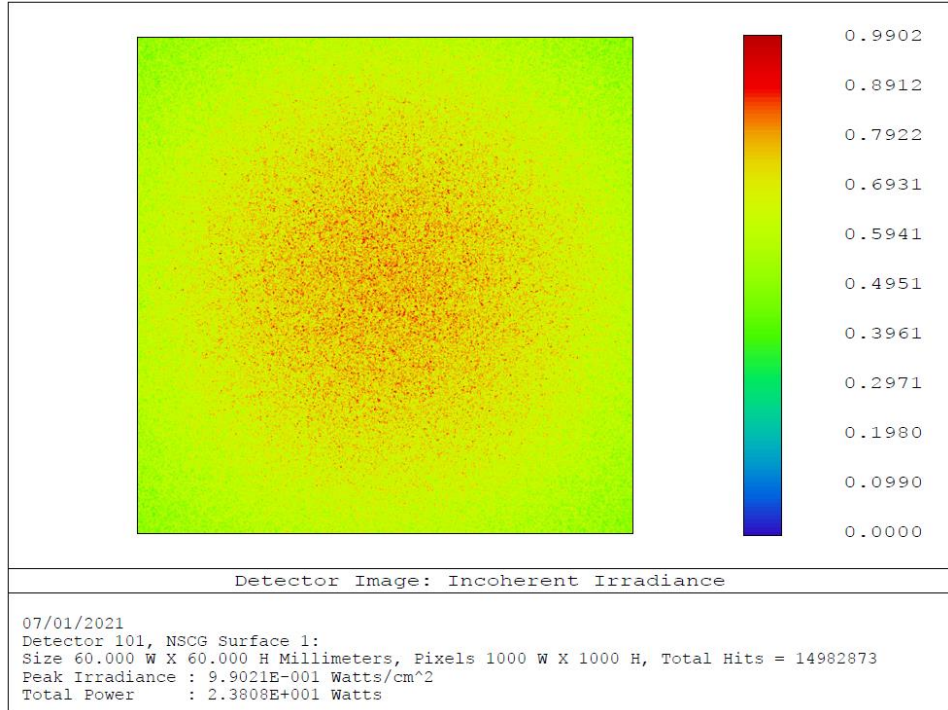
Irradiancia usando el reflector tipo “Rho”



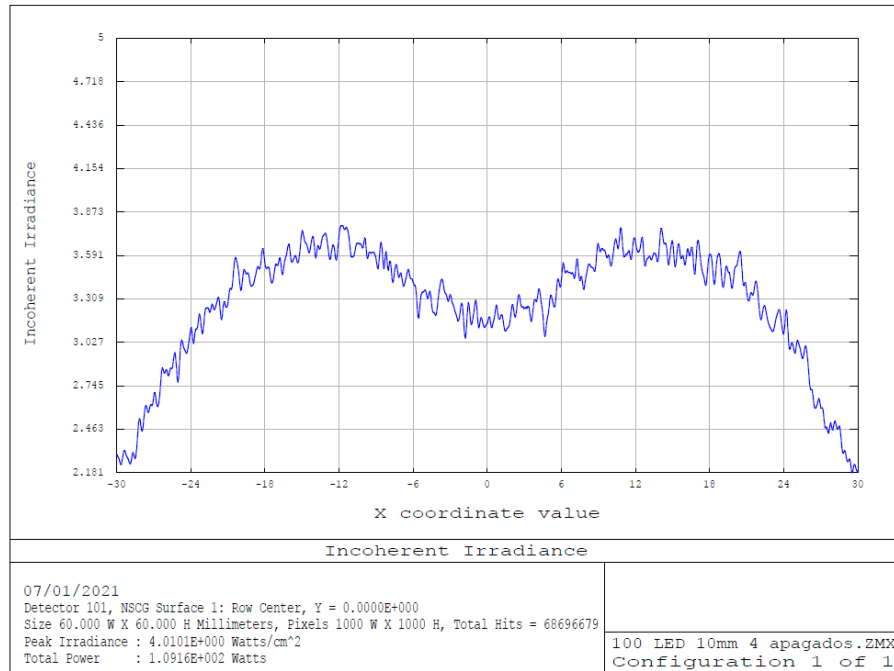
Irradiancia de un LED con reflector tipo “Rho”.



Irradiancia de un led a 10mm sin reflector con suavizado.



Irradiancia de la matriz de LED a 60mm de distancia sin reflector.



Corte transversal de la irradiancia con 4 LEDs apagados.

Referencias

- Chen, C., Cai, J., Wang, Q., Wang, Y., Zou, G., Zhao, Z., & Yong, C. (2014). Characterization of after-reflow misalignment on Head-in-Pillow defect in BGA assembly. *15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Chengdu, China, 1177-1180. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2014.6922853>
- Chun-quan, L., & Zhao-hua, W. (2005). Process management system analysis and design of SMT reflow soldering process. *6th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Shenzhen, China, 279-284. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2005.1564743>
- de Klein, F.J. (1996). Advantages of Protective Atmosphere Control for No-Clean Solder Pastes. *Soldering & Surface Mount Technology*, 8(2), 16-24. <https://doi.org/10.1108/09540919610777645>
- Dziurdzia, B., Sobolewski, M., & Mikolajek, J. (2020). Convection vs vapour phase reflow in LED and BGA assembly. *Soldering & Surface Mount Technology*, 30(2), 87-99. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2017-0031>
- Félix, M., Anguiano, C., Medel, A., Bravo, M., Salazar, D., & Márquez, H. (2012). Infrared thermography of BGA's heated by Focused Infrared Light Soldering System. *7th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, Taipei, Taiwan, 323-325. <https://doi.org/10.1109/IMPACT.2012.6420236>

- Gang Gao, J., Ping Wu, Y., Ding, H., & Hong Wan, N. (2008). Thermal profiling: a reflow process based on the heating factor. *Soldering & Surface Mount Technology*, 20(4), 20-27. <https://doi.org/10.1108/09540910810902679>
- Gao, J., Wu, Y., & Ding, H. (2007). Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor. *Soldering & Surface Mount Technology*, 19(1), 28-33. <https://doi.org/10.1108/09540910710748131>
- Goosey, M. (2005). Soldering considerations for lead-free printed circuit board assembly – an Envirowise Guide. *Circuit World*, 31(3), 40-44. <https://doi.org/10.1108/03056120510585063>
- Habib, A. H., Ondeck, M. G., Miller, K. J., Swaminathan, R., & McHenry, M. E. (2010, junio). Novel Solder-Magnetic Particle Composites and Their Reflow Using AC Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(6), 2187-2190. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2044640>
- Harrison, M. R., Vincent, J. H., & Steen, H. A. H. (2001). Lead-free reflow soldering for electronics assembly. *Soldering & Surface Mount Technology*, 13(3), 21-38. <https://doi.org/10.1108/09540910110407388>
- Heller Industries. (s.f.). *Heller Industries Model 1809 MK5*. [Hoja de datos].
- Illés, B., Medgyes, B., & Horváth, A. (2014). Electrochemical migration behaviour of surface finishes after vapour phase reflow soldering. *IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Bucharest, Rumania, 253-257. <https://doi.org/10.1109/SIITME.2014.6967039>

- Inoue, M., & Koyanagawa, T. (2005). Thermal simulation for predicting substrate temperature during reflow soldering process. *Proceedings Electronic Components and Technology, 2005. ECTC '05, 1*, 1021-1026.
<https://doi.org/10.1109/ECTC.2005.1441396>
- Jirsa, J., Dušek, K., & Cernek, P. (2012). Risk analysis of reflow technologies in electronics assembly. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bad Aussee, Austria, 178-182. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2012.6273134>
- Kim, M. R., Choi, Y. K., Lee, G. B., Chung, I. Y., & J. D. Kim. (1996). Thermal investigation of an infrared reflow furnace with a convection fan. *InterSociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems, I-THERM V*, Florida, Estados Unidos, 211-216. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.1996.534564>
- Lau, C. S., Khor, C. Y., Soares, D., Teixeira, J. C., & Abdullah, M. Z. (2016). Thermo-mechanical challenges of reflowed lead-free solder joints in surface mount components: a review. *Soldering & Surface Mount Technology*, 28(2), 41-62.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2015-0032>
- Lau, C., Abdullah, M.Z., & Che Ani, F. (2012). Computational fluid dynamic and thermal analysis for BGA assembly during forced convection reflow soldering process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 24(2), 77-91.
<https://doi.org/10.1108/09540911211214659>
- Lin, Y., Deng, W., Shie, J., & Yang, Y. (2007). Optimization of reflow soldering process for BGA packages by artificial neural network. *Microelectronics International*, 24(2), 64-70. <https://doi.org/10.1108/13565360710745610>

Mashkov, P., Pencheva, T., & Gyoch, B. (2009). Reflow soldering processes development using infrared thermography. *32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*, Brno, Republica Checa, 1-6.

<https://doi.org/10.1109/ISSE.2009.5207020>

OSRAM Opto semiconductors. (2020). *SFH 4716AS. Versión 1.8*. [Hoja de datos].

https://www.osram.com/ecat/OSLON%C2%AE%20Black%20SFH%204716AS/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2219877/

OSRAM Opto semiconductors. (2020). *SFH 4726AS. Versión 1.1*. [Hoja de datos].

https://www.osram.com/ecat/OSLON%C2%AE%20Black%20SFH%204726AS/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2219892/

Otáhal, A., Somer, J., & Szendiuch, I. (2017). Influence of heating direction on BGA solder balls structure. *21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition*, Warsaw, Polonia, 1-4.

<https://doi.org/10.23919/EMPC.2017.8346878>

Sakuyama, S., Uchida, H., Watanabe, I., Natori, K., & Sato, T. (1995). Reflow soldering using selective infrared radiation. *Proceedings of 1995 Japan International Electronic Manufacturing Technology Symposium*, Omiya, Japón, 393-396.

<https://doi.org/10.1109/IEMT.1995.541070>

Schüßler, F., Kozic, D., & Franke, J. (2009). Influences on the reflow soldering process by components with specific thermal properties. *Circuit World*, 35(3), 35-42.

<https://doi.org/10.1108/03056120910979530>

- Sooknuan, T., Phongklee, C., Wiboonjaroen, W., Thumma, M., & Amatachaya, P. (2019). Implementation the SoC of PCB Reflow Soldering. *16th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, Chonburi, Thailand, 385-388. <https://doi.org/10.1109/JCSSE.2019.8864197>
- Tian, Y., Wang, C., & Gong, J. (2003). Characteristics of interfacial microstructure of PBGA solder bump during multi-reflow and aging processes. *Fifth International Conference on Electronic Packaging Technology Proceedings*, Shanghai, China, 260-264. <https://doi.org/10.1109/EPTC.2003.1298736>
- Tian, Y., Wang, C., Pater, C. K., & Liu, D. (2002). Evolution of intermetallic compounds at interface between PBGA solder ball and pads during laser reflow soldering. *Proceedings of the 4th International Symposium on Electronic Materials and Packaging*, Kaohsiung, Taiwan, 167-172. <https://doi.org/10.1109/EMAP.2002.1188832>
- van den Ende, D. A., Hendriks, R., Cauchois, R., Kusters, R. H. L., Cauve, M., Groen, W. A., & van den Brand, J. (2014, noviembre). Photonic Flash Soldering of Thin Chips and SMD Components on Foils for Flexible Electronics. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 4(11), 1879-1886. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2014.2360410>
- Wang, X., Li, X., Pan, K., Zhou, B., & Jiang, T. (2014). Effect of reflow profile parameters on shear performance of Sn3.0Ag0.5Cu/Cu solder joint. *10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)*, Guangzhou, China, 691-693. <https://doi.org/10.1109/ICRMS.2014.7107286>

Xue, P., Xue, S., Zhang, L., Shen, Y., Gao, L., Yu, S., Zhu, H., Han, Z., & Chen, Y. (2011).

Tensile strength of fine pitch QFP lead-free soldered joints with diode laser soldering. *Soldering & Surface Mount Technology*, 23(3), 177-183.

<https://doi.org/10.1108/09540911111146935>

Yang, L., Bernstein, J. B., & Chung, K. (2001). The impact of lead-free soldering on electronics packages. *Microelectronics International*, 18(3), 20-26.

<https://doi.org/10.1108/13565360110405848>

Zhao, S., Huang, C., Tang, X., & Lu, L. (2018). Simulation analysis of residual stress of BGA solder joints after reflow soldering based on element birth and death technology. *19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Shanghai, China, 973-976,

<https://doi.org/10.1109/ICEPT.2018.8480531>

Zou, Y., Li, W., Wang, H., & Luo, D. (2016). Study on optimization of backward compatible reflow soldering process. *11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)*, Hangzhou, China, 1-6.

<https://doi.org/10.1109/ICRMS.2016.8050161>