

**ESTUDIO COMPARATIVO EN LA APLICACIÓN DE TUBOS DE CALOR
(HEAT PIPES) PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA EN UN
CIRCUITO ELECTRÓNICO.**

CARLOS EDUARDO MEJÍA MEJÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

**ESTUDIO COMPARATIVO EN LA APLICACIÓN DE TUBOS DE CALOR
(HEAT PIPES) PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA EN UN
CIRCUITO ELECTRÓNICO.**

CARLOS EDUARDO MEJÍA MEJÍA

**Tesis de grado presentada como requisito final
para optar el título de Ingeniero Electrónico**

Director

C. Rodrigo Correa C., PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

NOTA DE ACEPTACIÓN

Calificador

Calificador

Bucaramanga, 25 de Junio de 2004

Dedico esta tesis de grado a mis padres Julio y Olga, a
mis hermanos Olga, Andrés y Paca, a mi novia
Eliana, quienes han hecho de mí
lo que fui, lo que soy y
lo que seré.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dr. Carlos Rodrigo Correa Cely, quien me motivó a estudiar la transferencia de calor y realizar un proyecto respecto a ese tema.

Universidad Industrial de Santander y a todos sus docentes, quienes me enseñaron la importancia de realizar todos los trabajos con la mayor calidad y me brindaron toda la colaboración teórica y los equipos necesarios para cumplir con los objetivos de este trabajo de grado.

Electrificadora de Santander, quienes en un momento de emergencia me colaboraron para terminar esta tesis de grado de la forma más desinteresada posible aportando sus instalaciones, experiencia y equipos.

A mi familia, quienes me han formado como una persona íntegra y me han enseñado los valores para formarme en todos los aspectos del ser humano.

A mi novia y su familia, quienes con paciencia me comprendieron y sufrieron conmigo todos los problemas que se presentaban.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	4
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS	4
1.2. FUNDAMENTOS DEL TPTC	6
1.2.1. Principio de funcionamiento de un TPTC	7
1.3. TEORÍA DE LOS TPTC	8
1.3.1. El fluido	10
1.3.2. La malla	10
1.3.3. Límite capilar	11
1.3.4. Límite de ebullición	27
1.3.5. Límite de atrapamiento	28
1.3.6. Límite de sónico	29
1.3.7. Límite viscoso	29
1.3.8. Resistencia térmica de un TPTC	30
1.4. DIFERENTES TIPOS DE TPTC	32
1.5. APLICACIONES DE TPTC	34
1.6. TPTC EN APLICACIONES ELECTRÓNICAS	36
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	39
3. JUSTIFICACIÓN	41

4.	OBJETIVOS	44
4.1.	GENERAL	44
4.2.	ESPECÍFICOS	44
5.	METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO	45
5.1.	EQUIPOS UTILIZADOS	45
5.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS	45
5.2.1.	Cámara termográfica	45
5.2.1.1.	Panel de control	46
5.2.1.2.	Escáner	51
5.2.2.	Amplificador de potencia	51
5.3.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	54
5.3.1.	Determinación y comparación de la eficiencia de los disipadores.	55
5.3.2.	Perfil térmico a través del tiempo de un sistema de potencia antes y después de instalar un TPTC a diferentes frecuencias.	61
6.	RESULTADOS OBTENIDOS	67
6.1.	COMPARACIÓN DEL PERFIL TÉRMICO ANTES Y DESPUÉS DE UTILIZAR EL TPTC	67
6.1.1.	Continua (0 Hz)	67
6.1.2.	Baja frecuencia (10 Hz)	73
6.1.3.	Media frecuencia (100 Hz)	76
6.1.4.	Alta frecuencia (1 KHz)	80
6.2.	COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN TPTC CON OTROS DISIPADORES DE CALOR	83
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
7.1.	COMPARACIÓN DEL PERFIL TÉRMICO ANTES Y DESPUÉS DE UTILIZAR EL TPTC	89
7.1.1.	Continua (0 Hz)	89

7.1.2. Baja frecuencia (10 Hz)	91
7.1.3. Media frecuencia (100 Hz)	93
7.1.4. Alta frecuencia (1 KHz)	94
7.1.5. Comparación por disipadores	96
7.2. COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN TPTC CON OTROS DISIPADORES DE CALOR	99
8. PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA PREDECIR EL FUNCIONAMIENTO DE UN TPTC	102
8.1. VARIABLES DE ENTRADA	102
8.2. VARIABLES DE SALIDA	103
8.3. VENTANA DE INTRODUCCIÓN	103
8.4. VENTANA DE SELECCIÓN DE FLUIDO Y CONTENEDOR	104
8.5. VENTANA DE PARÁMETROS DEL MODELO	106
8.6. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA	108
9. CONCLUSIONES	109
10. RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	114
ANEXOS	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Analogía de circuitos eléctricos y térmicos.	6
Tabla 2. Tabla de toma de datos	57
Tabla 3. ANOVA disipador potencia	60
Tabla 4. Toma de datos	63
Tabla 5. ANOVA de temperatura con respecto al tiempo	64
Tabla 6. Datos obtenidos a 0 Hz	68
Tabla 7. ANOVA de experimento de tiempo y disipador	69
Tabla 8. Varianza de los diferentes factores	70
Tabla 9. Error tipo II	70
Tabla 10. Determinación de los Efectos Significantes	71
Tabla 11. Promedios Aritméticos	72
Tabla 12. Parámetros del Modelo	73
Tabla 13. ANOVA de experimentos de tiempo y disipador	73
Tabla 14. Datos obtenidos a 10 Hz	74
Tabla 15. Varianza de diferentes factores	75
Tabla 16. Error tipo II	75
Tabla 17. Determinación efectos significantes	75
Tabla 18. Promedios aritméticos	76
Tabla 19. Parámetros del modelo	76
Tabla 20. Datos obtenidos a 100 Hz	77

Tabla 21. ANOVA de experimentos de tiempo y disipadores	77
Tabla 22. Varianza de los factores	78
Tabla 23. Error tipo II	78
Tabla 24. Determinación de efectos significantes	78
Tabla 25. Promedios aritméticos	79
Tabla 26. Parámetros del modelo	79
Tabla 27. Datos obtenidos a 1KHz	80
Tabla 28. ANOVA del experimento de tiempo y disipador	81
Tabla 29. Varianza de los diferentes factores	81
Tabla 30. Error tipo II	81
Tabla 31. Determinación de efectos significantes	82
Tabla 32. Promedios aritméticos	82
Tabla 33. Parámetros del modelo	83
Tabla 34. Datos Obtenidos	84
Tabla 35. ANOVA del experimento	84
Tabla 36. Varianza sobre diferentes factores	85
Tabla 37. Error tipo II	85
Tabla 38. Determinación de los efectos significantes	86
Tabla 39. Test de DUNCAN potencia baja	87
Tabla 40. Eficiencia de los disipadores	87
Tabla 41. Test de DUNCAN potencia alta.	88
Tabla 42. Eficiencia de los disipadores	88
Tabla 43. Ventajas y desventajas de cada disipador	101

LISTA DE GRÁFICAS

Ilustración 1. TPTC transversal	7
Ilustración 2. TPTC longitudinal	7
Ilustración 3. Variación de la curvatura del menisco a lo largo del TPTC ⁴	8
Ilustración 4. Límites de transporte de calor en TPTC ⁵	9
Ilustración 5. Tipos de mallas ⁵	11
Ilustración 6. Contacto Húmedo y no Húmedo ⁵	13
Ilustración 7. Equivalente térmico de un TPTC	31
Ilustración 8. Cámara Termográfica	46
Ilustración 9. Panel de Control	46
Ilustración 10. Control de funciones	47
Ilustración 11. Panel de control de posición	48
Ilustración 12. Panel de control de la imagen	48
Ilustración 13. Control de proximidad	49
Ilustración 14. Control de SPAN	50
Ilustración 15. Perilla para cuadrar temperatura.	50
Ilustración 16. Escáner	51
Ilustración 17. Amplificador de Potencia	52
Ilustración 18. Circuito de Potencia Implementado	53
Ilustración 19. Transistor sin Disipador	58
Ilustración 20. Transistor con Aleta	58

Ilustración 21. Transistor con Ventilador	59
Ilustración 22. Transistor con TPTC vertical	59
Ilustración 23. Transistor sin Disipador	64
Ilustración 24. Transistor con TPTC horizontal	65
Ilustración 25. Transistor con TPTC vertical	65
Ilustración 26. Gráfica Temperatura Vs Tiempo	90
Ilustración 27. Gráfica Temperatura Vs Tiempo	91
Ilustración 28. Gráfica Temperatura Vs Tiempo	93
Ilustración 29. Gráfica Temperatura Vs Tiempo	94
Ilustración 30. Gráfica Temperatura vs. Tiempo del Transistor	96
Ilustración 31. Gráfica de temperatura vs tiempo con un TPTC horizontal	97
Ilustración 32. Gráfica Temperatura vs. Tiempo con un TPTC vertical	98
Ilustración 33. Ventana de selección de fluido y malla	105
Ilustración 34. Ventana de cálculo de calor disipado en función de la temperatura	107
Ilustración 35. Diagrama de flujo del programa	108

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Termografías tomadas para medir la eficiencia de los disipadores	116
ANEXO B. Procedimiento utilizado en la industria para la elaboración de TPTC	143

TITULO: ESTUDIO COMPARATIVO EN LA APLICACIÓN DE TUBOS DE CALOR (HEAT PIPES) PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA EN UN CIRCUITO ELECTRÓNICO.*

AUTOR: CARLOS EDUARDO MEJÍA MEJÍA**

PALABRAS CLAVES:

TEMPERATURA. DISIPACIÓN DE CALOR. TPTC. COMPARACIÓN. EFICIENCIA. POTENCIA. PERFIL TÉRMICO. PROGRAMA.

DESCRIPCIÓN:

Los TUBOS PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR (TPTC) son una alternativa para la disipación de calor eficiente en circuitos electrónicos. Este es un estudio comparativo dirigido a quienes están interesados en estudiar la disipación de calor como una consideración de diseño.

Este documento explica cual es el principio de funcionamiento, ecuaciones que rigen sus propiedades físicas y una descripción sobre sus diversas aplicaciones en la industria y especialmente en la electrónica.

Se deducen unas ecuaciones que predicen el funcionamiento a través del tiempo antes y después de instalado el TPTC en posición vertical y horizontal a diferentes frecuencias observando como el TPTC puede disipar calor de forma eficiente y a la velocidad que lo realiza.

También hace un estudio comparativo entre el TPTC y otros disipadores de calor como aletas y ventiladores evaluados y comparados unos con otros mediante unos criterios estadísticos en un circuito de alta y baja potencia y concluyendo cual es el más eficiente de los tres para un circuito amplificador de potencia.

Por último el documento comenta el funcionamiento de un software que modela y simula el funcionamiento de un TPTC en función de la temperatura para poder tener una idea básica sobre como se podría diseñar alguno para una aplicación en particular, pensando en que algún día en el país se pueda construir este tipo de disipadores.

* Tesis de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director C. Rodrigo Correa C., PhD

TITLE: COMPARATIVE STUDY IN THE APPLICATION OF HEAT PIPES FOR THE DISSIPATION OF THERMAL ENERGY IN AN ELECTRONIC CIRCUIT.*

AUTHOR: CARLOS EDUARDO MEJÍA MEJÍA**

KEY WORDS: TEMPERATURE. HEAT DISSIPATION. HEAT PIPES. COMPARISON. EFFICIENCY. POWER. THERMAL PROFILE. PROGRAM.

DESCRIPTION:

The HEAT PIPES are an alternative for the efficient heat dissipation in electronic circuits. This it is a comparative study directed to those who is interested in studying the heat dissipation as a design consideration.

This document explains as it is the principle of operation, equations that specially govern their physical properties and a description on their diverse applications in the industry and in the electronics.

Equations are deduced to predict the operation of the TPTC through the time before and after is installed in a vertical and horizontal position to different frequencies observing as the TPTC can dissipate heat in a efficient form and the speed that makes it.

Also it makes a comparative study between the TPTC and other heat dissipators as fins and ventilators evaluated and compared with others by statistical criteria means in a circuit at low and high power concluding who is the most efficient of the three for an amplifying power circuit.

Finally the document comments the operation of a software that models and simulates the operation of a TPTC based on the temperature to have a basic idea on like could be designed some for an application in individual, thinking about that someday in the country this type of dissipators can be constructed.

* Degree thesis

** Faculty of Mechanical Engineerings Physias. School of Electrical, Electronic Engineering and Telecommunications. Director C. Rodrigo Correa C., PhD

INTRODUCCIÓN

Un problema común y tal vez de muchos ingenieros electrónicos en sus diseños es no pensar en la potencia que consumen sus equipos, que esta se transforma en calor y se manifiesta por un incremento en la temperatura ocasionando daños o perjuicios en el funcionamiento correcto de los elementos y por consiguiente haciéndolos tener una vida útil menor a la esperada.

Este trabajo de grado tiene el objetivo de presentar un tipo de disipador, eficiente, utilizado en muchos países desde hace muchos años y usados en múltiples de aplicaciones industriales, pero no necesariamente en la disipación de calor de circuitos electrónicos. Estos disipadores se llaman "Heat pipes", tubos para la transferencia de calor o como se denomina en este trabajo de grado TPTC.

El TPTC es un dispositivo de alta conductancia térmica. La idea de un TPTC fue sugerida por R.S. Gaugler en 1942. Pero no fue sino hasta 1960 cuando G.M. Grover hizo estudios más completos sobre su funcionamiento y obteniendo mejoras significativas. Se puede observar que no es un invento nuevo y tiene múltiples de aplicaciones donde es necesario bajar la temperatura de operación.

Se presentará un marco teórico sobre las propiedades físicas que involucran el funcionamiento de los TPTC, las partes que lo componen y los límites que posee para que su funcionamiento no sea el apropiado. Este trabajo implicó una búsqueda exhaustiva y rigurosa en la literatura indexada y no indexada debido a que la bibliografía que se encuentra a la mano es muy pobre y no comenta a groso modo acerca de las aplicaciones en los dispositivos electrónicos.

También se describirá el funcionamiento de los equipos utilizados durante este proyecto, explicando con mayor profundidad el funcionamiento de la cámara termográfica.

Se realizará un perfil térmico a través del tiempo para observar como el TPTC baja la temperatura del dispositivo electrónico de alta potencia y realizar un modelo de su operación con respecto del tiempo. También se comparará con otros disipadores de calor como son las aletas y el ventilador y se calculará su eficiencia térmica para observar las ventajas y las desventajas de unos con otros.

Se presenta a los lectores, un estudio actual, pionero en la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, la cual puede ser una fuente de inspiración para que otros investigadores profundicen en la transferencia de calor en circuitos electrónicos, un área inexplorada y necesaria para el diseño de dispositivos electrónicos.

El autor espera que la tesis sea de su agrado y que a través de las siguientes páginas, haya un mejor entendimiento del tema y sus resultados.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Un “heat pipe” o “tubo para la transferencia de calor” (TPTC) es un dispositivo de muy alta conductancia térmica que transporta calor de una sección a otra por medio de la evaporación y condensación de un fluido con el propósito de producir un equilibrio térmico.

Este capítulo explica los principios básicos de operación de los TPTC y sus aplicaciones en la industria; se centrará su estudio principalmente desde el punto de vista de la electrónica, requiriendo los conceptos de la termodinámica, transferencia de calor y flujo de fluidos.

Para una mayor cobertura en el tratamiento de los temas aquí presentados, se remite al lector a la bibliografía incluida al final del trabajo de grado [1-13].

1.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Para comenzar el estudio acerca del funcionamiento del TPTC es indispensable conocer algunos conceptos que durante la lectura de este documento puedan servir de referencia.

CALOR: El calor según J.A. Beattie "... se define como una cantidad que fluye a través de la frontera de un sistema durante un cambio de estado en virtud de

una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno y que fluye de un punto de temperatura mayor a otro de temperatura menor”¹.

La unidad de calor en el sistema internacional es el Watt. Cuando el calor es transmitido hacia un sistema se considera positivo y el calor transmitido desde un sistema es negativo. En un sistema **adiabático** no hay transferencia de calor. El calor depende de la trayectoria que siga el sistema durante el cambio de estado.

PRESIÓN: La presión es “la componente normal de fuerza por unidad de superficie”². La unidad de presión en el sistema internacional es N/m^2 . La presión en un punto de un fluido en equilibrio es la misma en todas direcciones.

TENSIÓN SUPERFICIAL: “La tensión superficial de un líquido es la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área”³. Es la fuerza de atracción entre los átomos y moléculas de un elemento o de un compuesto respectivamente. Las moléculas de un líquido son atraídas entre si por medio de sus fuerzas intermoleculares, conservando un equilibrio natural entre ellas. Los líquidos cuyas moléculas tengan fuerzas de atracción intermoleculares fuertes tendrán tensión superficial mayor.

CALOR LATENTE: Es el calor que es necesario adicionar o sustraer a una sustancia para el cambiar de estado físico. Está estrechamente relacionado con la tensión superficial.

CIRCUITOS TÉRMICOS: Para calcular la cantidad de calor que fluye a través de un cuerpo y/o su diferencia de temperatura, de forma que tanto ingenieros electricistas y electrónicos lo puedan entender, es necesario hacer una analogía entre circuitos térmicos y circuitos eléctricos tal como se observa en la tabla 1.

CIRCUITOS ELÉCTRICOS	CIRCUITOS TERMICOS
Voltaje (V)	Temperatura (T)
Corriente (I)	Flujo de calor (Q)
Resistencia eléctrica (R)	Resistencia térmica (R _{th})
Resistencia eléctrica = $\frac{\text{Dif. Voltaje}}{\text{Corriente}}$	Resistencia térmica = $\frac{\text{Dif. Temperatura}}{\text{Flujo de calor}}$

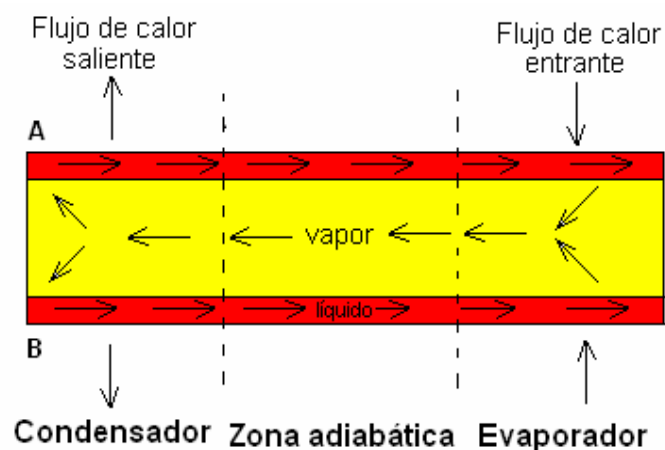
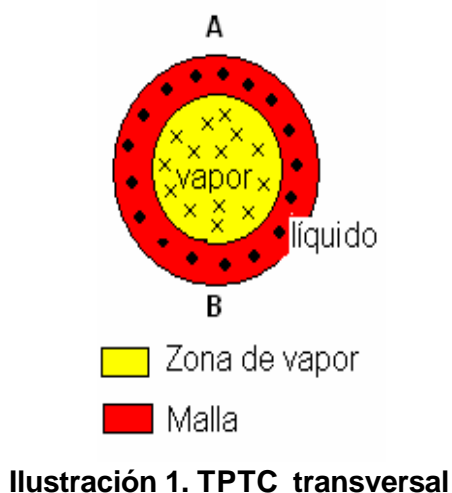
Tabla 1. Analogía de circuitos eléctricos y térmicos.

1.2. FUNDAMENTOS DEL TPTC

El TPTC consta de un tubo llamado el contenedor, un material con alta capilaridad denominada la malla y un fluido. El tubo, en su interior, se encuentra a presión de vacío con el propósito de hacer que el fluido encuentre su punto de ebullición a una temperatura mas baja. El TPTC se divide en tres secciones: el evaporador, la zona adiabática y el condensador.

El calor se transmite por la sección del evaporador ocasionando que el fluido cambie de líquido a vapor; este vapor viaja a través del tubo concéntrico hasta la sección del condensador donde el fluido cambia de vapor a líquido provocando que el calor sea retirado hacia el exterior. Luego el fluido en forma líquida es devuelto a la sección del evaporador por medio de las fuerzas capilares de la malla y el ciclo se reinicia. La ilustración 1 y 2 da una

explicación visual del dispositivo y su funcionamiento. En la ilustración 1 se observa que en el vapor fluye a través de la zona de vapor (Color amarillo) y el líquido viaja a través de la malla (Color rojo). La ilustración 2 muestra las 3 secciones del tubo (evaporador, zona adiabática y condensador), se puede apreciar, por medio de las flechas, que el fluido en forma de vapor viaja del evaporador al condensador y después es devuelto en estado líquido por medio de la malla. También se puede ver como el calor que se transmite al TPTC en el evaporador es transferido al condensador.



1.2.1. Principio de funcionamiento de un TPTC

Como se mencionaba el TPTC se divide en tres secciones. El evaporador es la sección que se coloca en contacto directo con el dispositivo que genera calor; el condensador es la sección donde se baja la temperatura del fluido para ser devuelto al evaporador en forma líquida. Usualmente al condensador se le acopla un disipador de calor como una aleta, un ventilador u otro TPTC. Una

zona intermedia correspondiente a la zona adiabática que no permite que haya caídas de temperatura considerables y pérdidas de calor a lo largo del tubo.

Cuando el calor es aplicado en el evaporador, el líquido se queda dentro de los poros de malla formando, en la interfase vapor – líquido, un menisco convexo como se puede ver en la ilustración 3. “Entre mas se acerca a la zona de condensación la forma del menisco tiende a ser mas plana”⁴.

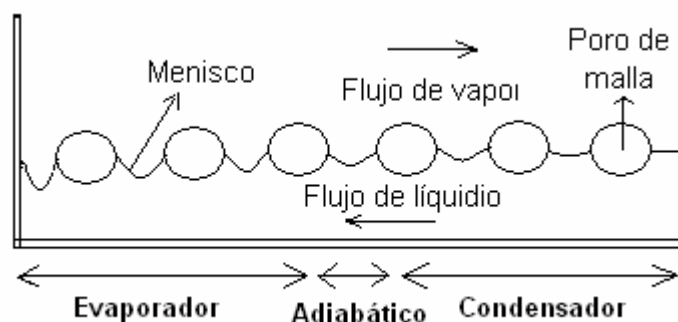


Ilustración 3. Variación de la curvatura del menisco a lo largo del TPTC⁴

1.3. TEORÍA DE LOS TPTC

Durante la operación del TPTC hay factores limitantes en la transferencia de calor de una sección a otra que es importante tener en cuenta para bajas, medias y altas temperaturas. Estos son:

- Límite de viscosidad.
- Límite de la velocidad del sonido.
- Límite de atrapamiento.

- Límite capilar.
- Límite de ebullición.

La ilustración 4 muestra como a medida que la temperatura aumenta hay limitantes en la operación de los TPTC, con las cuales se puede predecir la cantidad de calor máxima que puede retirar a una cierta temperatura.

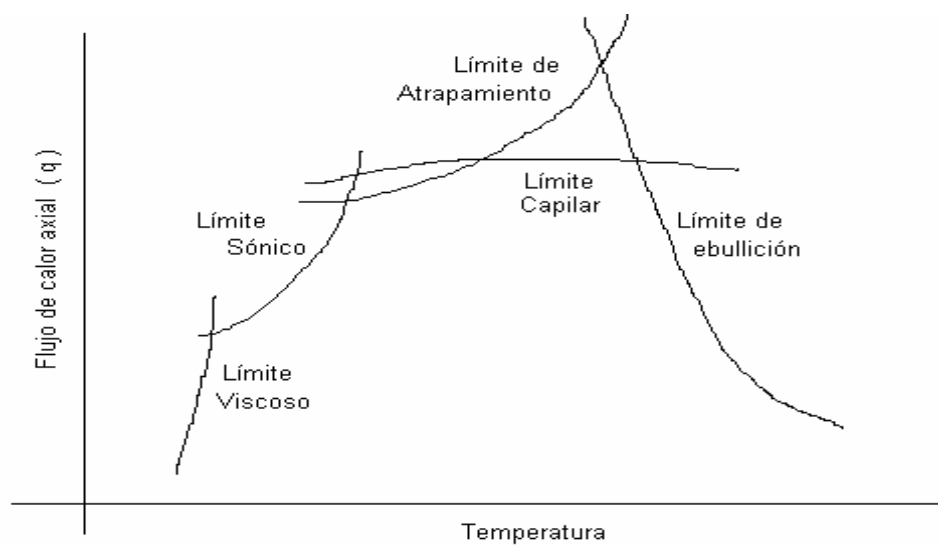


Ilustración 4. Límites de transporte de calor en TPTC⁵

Para determinar la máxima cantidad de calor que puede retirar un líquido de forma aproximada puede ayudarse de la figura de mérito (M), expresado en la ecuación (1).

$$M = \frac{r_l s_l l}{m_l} \quad (1)$$

Donde ρ_l es la densidad del líquido, s_l es la tensión superficial, μ_l es la viscosidad del fluido y l es el calor latente. "La forma en que varia la figura de mérito depende también de la temperatura del fluido"⁵.

1.3.1. El fluido

El tipo de fluido de los TPTC es un factor importante en el momento de saber el margen de temperaturas de operación porque determinará la cantidad de calor que puede retirar. Las características del fluido que se debe tener presentes en el momento de decidir son:

- Compatibilidad con la malla y el contenedor.
- Calor latente alto.
- Alta conductividad térmica.
- Alta tensión superficial.
- Baja viscosidad en forma de vapor y líquido.
- Capacidad de humedecer el material de la malla del TPTC.

1.3.2. La malla

La malla en un TPTC debe tener la capacidad de generar la presión capilar necesaria para que el fluido retorne en forma líquida del condensador al evaporador. La ilustración 5 muestra los diferentes tipos de mallas, la más utilizada es la malla con cubierta. “Para su elección se debe mencionar un parámetro llamado el “número de malla” que es usado a una referirse a la capilaridad de la cubierta”⁵. Este define el número de mallas por unidad de longitud.

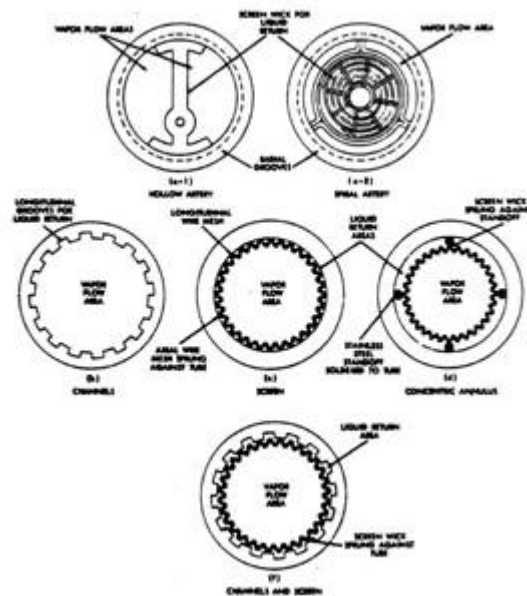


Ilustración 5. Tipos de mallas ⁵

1.3.3. Límite capilar

“La capilaridad es la capacidad que tiene un material para que circule un líquido a través de su estructura”⁴. El límite capilar es un fenómeno que ocurre cuando el material de la malla no puede bombear más líquido hacia la sección del evaporador.

“La capilaridad depende básicamente de las fuerzas de Adhesión (Fuerzas entre diferentes moléculas) y de cohesión (Fuerzas entre moléculas del mismo tipo)”⁴. Este tipo de fuerzas son las que producen que la tensión superficial de un líquido y la malla sean compatibles.

Balance de la presión capilar:

Una de las condiciones básicas y necesarias a tener en cuenta para que los TPTC operen de forma satisfactoria es que la presión máxima de bombeo capilar ($P_{m\acute{a}x}$), debe ser mayor que la presión arrojada por el tubo. Esta presión arrojada esta dada por 3 componentes:

- P_l ? Presión requerida para retornar el líquido del condensador al evaporador.
- P_v ? Presión requerida para que el vapor fluya del evaporador al condensador.
- P_g ? Presión debida a la fuerza de gravedad la cual puede ser positiva, negativa o cero.

Entonces:

$$\boxed{(\Delta P_c)_{\max} > \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g} \quad (2)$$

“Si esta condición no se llegara a cumplir, la malla se secaría en la región de evaporación y el tubo no operaría de forma adecuada”⁵.

Máxima presión capilar:

Cuando entra en contacto un líquido y un sólido se experimentan entre ellos una fuerza de adhesión. Dependiendo de este tipo de fuerzas el líquido se curvará hacia arriba o hacia abajo. Por medio de esta curva es posible definir

un ángulo de contacto (θ) el cual indicará si el líquido tiene capacidad de humedecerse. Si $0 < \theta < \pi$ será húmedo y si $\theta > \pi$ no lo será como se puede observar en la ilustración 6.

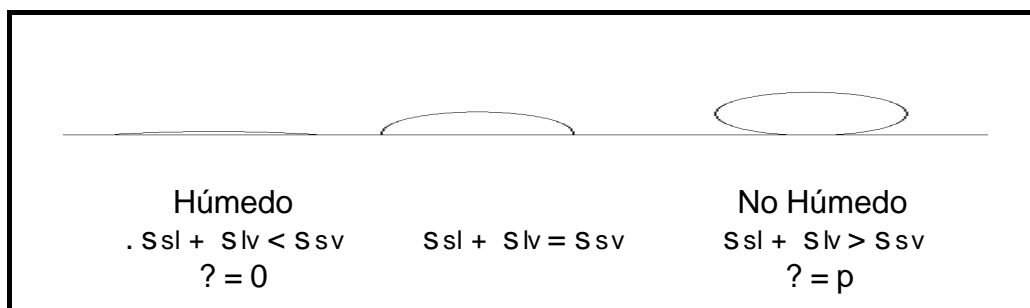


Ilustración 6. Contacto Húmedo y no Húmedo⁹

Presión diferencial a través de una superficie curva:

Para una superficie esférica la tensión superficial a través de una circunferencia esta dada por $2\pi R\sigma_l$ y esta a su vez es igual a la presión diferencial a través de superficie transversal $\Delta P \times \pi R^2$. Por lo tanto:

$$\Delta P = 2 \frac{\sigma_l}{R} \quad (3)$$

La presión diferencial ΔP depende de la tensión superficial σ_l y el radio de curvatura R.

Si posee dos radios de curvatura la diferencia de presión sería:

$$\Delta P = 2\sigma_l \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

En el caso de un tubo vertical de radio r , el líquido es absorbido por una fuerza capilar que humedece el material de un malla. El líquido subirá a través de la malla hasta una altura h con respecto a la superficie. El balance de presiones será:

$$r_l gh = \frac{2s_l \cos \theta}{r} \quad (5)$$

Donde r_l es la densidad del líquido y θ es el ángulo de contacto.

Se asume que el líquido desplazado deja una columna de vapor a través de tubo comunicante, entonces podemos asumir que la presión de vapor y la presión en la malla del tubo son iguales:

$$P_c - P_o = r_v gh \quad (6)$$

Donde $P_c - P_o$ es la diferencia de presión de la malla. Si se asume que r_v es constante entonces:

$$(r_l - r_v) gh = \frac{2s_l}{r} \quad (7)$$

$$P_c - P_o = \frac{2s_l}{r} \frac{r_v}{(r_l - r_v)} \quad (8)$$

La presión diferencial $P_c - P_o$ es pequeña comparada con la expresión de la presión capilar de la ecuación (3). Entonces la presión diferencial puede ser despreciada al momento de diseñar un TPTC.

Dependencia entre la tensión superficial y la temperatura:

“Esta relación es empírica”⁵. Se puede observar por medio de la práctica que a medida que la temperatura crece la tensión superficial decrece, un ejemplo cotidiano ocurre al calentar agua donde las moléculas de líquido se sueltan y se vuelven vapor. Esta fórmula la dedujo Eötvös y luego fue modificada por Ramsay y Shields obteniendo el siguiente resultado:

$$s_l \left(\frac{M}{r_l} \right)^{2/3} = H (T_c - 6 - T) \quad (9)$$

Donde M es la masa molecular, T_c es la temperatura crítica en K y H es constante.

No es correcto utilizar la ecuación (9) en TPTC que utilizan como fluidos líquidos metálicos o sales fundidas. Entonces Bohdaski y Shins dedujeron la siguiente ecuación para este tipo de fluidos:

$$\frac{s_l}{s_{lo}} = 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right) - 0.40 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right) \left(\frac{T}{T_c} \right) \quad (10)$$

Donde s_{lo} es la tensión superficial de referencia y T_c es la temperatura crítica.

Esta ecuación solamente es aplicable a temperaturas menores al 10% de la temperatura crítica (T_c).

Presión capilar P_c .

Tomando la ecuación (3) y si

$$R \cos \mathbf{q} = r \quad (11)$$

La presión capilar en las secciones del evaporador y condensador es:

- Evaporador:
$$\Delta P_e = \frac{2 \mathbf{s} l (\cos \mathbf{q}_e)}{r_e} \quad (12)$$

- Condensador
$$\Delta P_c = \frac{2 \mathbf{s} l (\cos \mathbf{q}_c)}{r_c} \quad (13)$$

De esta forma la presión capilar resultante será la diferencia de ambas presiones:

$$\Delta P_c = 2 \mathbf{s} l \left(\frac{\cos \mathbf{q}_e}{r_e} - \frac{\cos \mathbf{q}_c}{r_c} \right) \quad (14)$$

Si se considera que $\cos \mathbf{q}_e = 1$ y $\cos \mathbf{q}_c = 0$, el valor máximo de la presión capilar será:

$$\boxed{\Delta P_c = \frac{2 \mathbf{s} l}{r_e}} \quad (15)$$

Presión diferencial debido las fuerzas de fricción:

Flujo laminar:

La velocidad de flujo laminar en un líquido incompresible de viscosidad (μ) constante a través de un tubo de sección circular de radio (a), es descrito por la siguiente ecuación:

$$V_r = \left(\frac{a^2}{4\mu} \right) \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right) \frac{(p_2 - p_1)}{l} \quad (16)$$

Su máxima velocidad será:

$$V_{m\acute{a}x} = \left(\frac{a^2}{4\mu} \right) \frac{(p_2 - p_1)}{l} \quad (17)$$

De la ecuación (16) se puede deducir que en un tubo circular la velocidad de flujo es 0 en la pared y máximo en el centro. La velocidad promedio es:

$$V = \left(\frac{a^2}{8\mu} \right) \frac{(p_2 - p_1)}{l} \quad (18)$$

Por lo tanto el flujo de volumen por segundo es:

$$S = V \pi a^2 = \left(\frac{\pi a^4}{8\mu} \right) \frac{(p_2 - p_1)}{l} \quad (19)$$

Si ρ es la densidad del fluido y m es la masa entonces el flujo de masa estará dada por:

$$\dot{m} = \rho S = \rho \left(\frac{\rho a^4}{8 \mu} \right) \frac{(p_2 - p_1)}{l} \quad (20)$$

Número axial de Reynolds (Re):

A medida que la velocidad del fluido crece el flujo pasa de laminar a turbulento, el punto de transición está dado por el número de Reynolds expresado en la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (21)$$

Donde $d = 2a$, donde a es el radio del tubo de sección circular y por consiguiente d el diámetro.

Cuando $Re > 2100$ el flujo cambia de laminar a turbulento y el perfil de velocidad cambia. Con el número de Reynolds podemos determinar un parámetro como el largo del TPTC de la siguiente forma:

Si se tiene la presión dada por la energía cinética:

$$\Delta P_{ke} = \frac{\rho V^2}{2} \quad (22)$$

Y la presión dada por las fuerzas de viscosidad es:

$$\Delta P_f = \frac{8 \mu V l}{a^2} \quad (23)$$

Y asumimos que el flujo es laminar y ambas presiones son iguales, obtenemos que:

$$\frac{\Delta P_{ke}}{\Delta P_f} = \frac{a \text{ Re}}{32 l} \quad (24)$$

$$l = \frac{a \text{ Re}}{32} \quad (25)$$

Flujo turbulento:

La diferencia de presión esta relacionada con la velocidad del flujo por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{(p_2 - p_1)}{l} = \frac{2 f \rho V^2}{d} \quad (26)$$

Donde f es el factor de Fanning, el cual es igual a:

$$f = \frac{0.0791}{\text{Re}^{1/4}} \dots 2100 < \text{Re} < 10^5 \quad (27)$$

$$f = \frac{16}{\text{Re}} \dots \text{Re} > 2100$$

Para no hacer muchos cálculos “se puede asumir que el flujo es siempre laminar en la región adiabática y de evaporación, para la región de condensación turbulenta”⁵.

Presión diferencial en la fase líquida ? P_l .

Primero hay que considerar la altura efectiva para un fluido dada por la siguiente expresión:

$$l_{eff} = l_a + \frac{(l_e + l_c)}{2} \quad (28)$$

También hay que considerar el tipo de malla capilar, la cual puede ser de diferentes tipos, como se mencionará a continuación:

- **Mallas homogéneas:** Para el cálculo de la diferencia de presión solo es necesario conocer un factor llamado "Fracción de Huecos" en la Malla (e). La fracción de líquido que contiene la malla de sección circular está dada por la siguiente expresión:

$$p (r_w^2 - r_v^2) e \quad (29)$$

Su masa está dada por la siguiente ecuación:

$$m = \frac{(p (r_w^2 - r_v^2) e) r_l r_c^2 \Delta Pl}{8 m_l l_{eff}} \quad (30)$$

Como $Q = m \cdot h$ siendo Q la cantidad de calor, la presión diferencial de líquido será:

$$\Delta P_l = \frac{8 m_l Q l_{eff}}{2 p ((r_w^2 - r_v^2) e) r_l l r_c^2} \quad (31)$$

Si se aplica la ecuación (31) es difícil obtener con exactitud los valores de r_c y e . Una expresión donde sus variables se pueden obtener con mayor exactitud que los anteriores se observa en la siguiente ecuación:

$$\Delta P_l = \frac{m_l m l_{eff}}{r_l K A} \quad (32)$$

Donde K es la permeabilidad de la malla, A es el área de sección transversal. K y A son más fáciles de calcular.

- **Malla con canales:** La caída de presión está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_l = 8 \frac{m_l Q l_{eff}}{p r_e^4 N r_l l} \quad (33)$$

Donde N es el número de canales y r_e es el radio efectivo de canal.

Cuando la velocidad de vapor es alta, las fuerzas capilares tienden a impedir que el líquido fluya a través de sus canales. Con el fin de evitar este fenómeno es necesario apantallarlos.

- **Mallas compuestas:** Está conformada por una serie de anillos separados de la pared del TPTC que ayuda a distribuir el líquido en el evaporador y condensador.

La siguiente fórmula es aplicada a superficies paralelas donde el ancho de la malla w es pequeño comparada con el espacio del vapor r_v .

$$\Delta P_l = \frac{2.4 m_l Q l_{eff}}{p r_v w^3 r_l l} \quad (34)$$

“Este tipo de malla es utilizado en TPTC que utilizan como fluido metal líquido”⁵.

Presión de vapor diferencial ΔP_v .

La diferencia de presión de vapor va a ser la suma de las presiones en las tres regiones: ΔP_{va} en la zona adiabática, ΔP_{vc} en el condensador y ΔP_{ve} en el evaporador.

Es difícil calcular la presión en el evaporador y en el condensador debido al flujo radial ocasionado por la evaporación y la condensación del fluido respectivamente. Entonces es necesario calcular el número de Reynolds radial (R_r) dado por la siguiente expresión:

$$R_r = \frac{r_v V r_v}{m_v} \quad (35)$$

Donde V es la velocidad radial en la malla.

R_r es positiva en la región del evaporador y R_r es negativa en la región del condensador. R_r puede estar en el margen de 0.1-100 y esta relacionada con la cantidad de masa por unidad de longitud. Cuando la evaporación es uniforme a través de la sección el número de Reynolds está dado por la siguiente expresión:

$$R_r = \frac{R_e r_v}{4 z} \quad (36)$$

Donde z es la distancia tanto del evaporador o del condensador según sea el caso.

- **Flujo incompresible:** Al decir que un gas es incompresible decimos que la velocidad V es menor a la velocidad del sonido C , en otras palabras, $V/C < 0.3$. Esta interpretación no será cierta para líquidos metálicos a altas temperaturas.

Para que la presión de vapor en el evaporador se pueda calcular hay 2 variables que es necesario conocer:

- Presión Inercial. (? P')
- La presión dada por fuerza de fricción. (? P'')

Si la presión inercial en el evaporador está dada por la expresión:

$$\Delta P' = r V^2 \quad (37)$$

Se asume que el flujo es laminar, entonces la presión debido a la fuerza de fricción será:

$$\Delta P'' = \frac{8 m_v m l_e}{2 r_p r_v^4} \quad (38)$$

La presión de vapor total de la región del evaporador será la suma de la presión inercial y la presión dada por la fuerza de fricción:

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P'' \quad (39)$$

En la región de condensación se calcula de la misma forma pero la velocidad se puede asumir que es cero ya que la presión en esta región cae. En consecuencia no hay término inercial.

En la región adiabática, si se asume que el flujo es laminar la presión estará dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_a = \frac{8 m_v m l_a}{r_p r_v^4} \quad \text{Para } Re < 2100 \quad (40)$$

Y si es turbulento:

$$\Delta P_a = \frac{f r_v V^2 l_a}{r_v} \quad \text{Para } Re > 2100 \quad (41)$$

Donde f es el número de fanning.

La presión de vapor, como se había dicho al principio, es la suma de las caídas de presión de cada una de las secciones, por lo tanto:

$$\Delta P_v = \Delta P_{ve} + \Delta P_{va} + \Delta P_{vc} \quad (42)$$

Si se asume que el flujo es laminar la presión de vapor será:

$$\Delta P_v = \frac{rV^2 + 8m_v m \left(l_a + \frac{l_e}{2} + \frac{l_c}{2} \right)}{rpr_v^4} \quad (43)$$

- **Flujos compresibles:**

En un tubo cilíndrico el flujo de masa se incrementa a lo largo del evaporador consiguiendo su mayor velocidad y mas baja presión al final de esta sección. Luego su velocidad decrece a través de la sección del condensador.

Si la presión baja lo suficiente en el TPTC para que la velocidad de vapor del fluido sea igual o mayor a $0.3C$, donde C es la velocidad del sonido, se produce una caída en la diferencia de temperatura entre el evaporador y el condensador, ocasionando en consecuencia que el TPTC deje de funcionar. Entonces si se quiere mantener un proceso a una diferencia de temperatura constante es necesario que la presión de vapor no baje demasiado.

Presión gravitacional ? P_g:

Esta presión puede ser positiva, negativa o cero, dependiendo de la posición relativa del evaporador y del condensador, la diferencia de presión gravitacional se expresa como:

$$\Delta P_g = \rho_l g l \sin \Phi \quad (44)$$

Donde ρ_l es la densidad del líquido, g es la aceleración de la gravedad, l es la longitud del TPTC y Φ es el ángulo con la horizontal.

Por último, si se calcula el máximo flujo de masa (\dot{m}) a lo largo de un TPTC se puede predecir la cantidad de calor máxima que puede retirar el TPTC.

Si se asume las siguientes consideraciones:

- Las propiedades de los líquidos no varían a lo largo del TPTC.
- La malla es uniforme a lo largo del tubo.
- La caída de presión dada por el flujo de vapor puede ser despreciada.

El máximo flujo de masa en el TPTC es:

$$\dot{m}_{\max} = \left(\frac{\rho_l s_l}{\rho_l} \right) \left(\frac{KA}{l} \right) \left(\frac{2}{r} - \frac{\rho_l l g}{s_l} \sin \Phi \right) \quad (45)$$

Entonces el flujo máximo de calor (Q_{\max}) estará dado por la siguiente expresión:

$$Q_{\max} = m_{\max} l \quad (46)$$

$$Q_{\max} = \left(\frac{r_l s_l l}{m_l} \right) \left(\frac{KA}{l} \right) \left(\frac{2}{r} - \frac{r_l \lg}{s_l} \text{sen } f \right) \quad (47)$$

1.3.4. Límite de ebullición

Cuando el flujo radial de calor en el evaporador se vuelve muy alto, el líquido de la malla en la sección del evaporador se puede sobrecalentar ocasionando burbujas en el interior de la malla. Estas burbujas hacen que el líquido no humedezca la pared del tubo y se seque la malla de la sección del evaporador y el calor que se pueda retirar sea poco. La cantidad de calor está dado por la siguiente expresión:

$$q_{\text{ebullición}} = \left(\frac{2pL_e k_{\text{eff}} T_v}{l r_v \ln(r / r_v)} \right) \left(\frac{2s_l}{r_v} - (\Delta P_c)_{\max} \right) \quad (48)$$

Donde L_e es el tamaño del evaporador, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva, T_v es la temperatura del vapor, ρ es el calor latente, r es el radio de TPTC, r_v es el radio del espacio de vapor, s_l es la tensión superficial y $(\Delta P_c)_{\max}$ es la presión capilar máxima.

1.3.5. Límite de atrapamiento

En un TPTC el líquido y el vapor se mueven en direcciones opuestas provocando que se produzca una fuerza resultante en la malla, es decir, la interfaz entre ellas. Las altas velocidades del vapor pueden causar que algo de líquido pueda ser devuelto a la sección de condensación e imposibilitar que el líquido llegue al evaporador. A este fenómeno se le denomina el límite de atrapamiento.

El número de Weber es la relación entre el vapor inercial y la tensión superficial del líquido y da una idea acerca del límite de atrapamiento, el número de Weber se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W_e = \frac{\rho_v V^2 e}{2 \rho s_l} \quad (49)$$

Donde ρ_v es la densidad del vapor, s_l es la tensión superficial, V es la velocidad del vapor y e es la relación de espacios en la malla.

El atrapamiento ocurrirá cuando $W_e = 1$, entonces:

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \rho s_l}{\rho_v e}} \quad (50)$$

Si $q = \rho_v V$ entonces:

$$q_{\text{atrapamiento}} = \sqrt{\frac{2 \rho r_v l^2 s_l}{e}} \quad (51)$$

1.3.6. Límite de sonido

La velocidad de flujo de vapor se incrementa a lo largo del evaporador y alcanza su valor máximo al final de esta sección. Cuando el flujo de vapor alcanza la velocidad del sonido la cantidad de calor que puede desalojar permanece constante. El límite sónico está dado por la siguiente expresión:

$$q_{sonido} = 0.474 I (P_v r_v)^{0.5} \quad (51)$$

1.3.7. Límite viscoso

A muy bajas temperaturas la presión de vapor y líquido del evaporador es muy pequeña, adicionalmente las fuerzas viscosas a lo largo de la región de vapor puede ser mayor que la diferencia de presión en el tubo. En consecuencia la diferencia de presión puede no ser lo suficiente para generar el flujo de vapor necesario, debido a que no se rompen los enlaces del líquido. Este fenómeno ocurre cuando el TPTC se opera a una temperatura menor de lo normal.

$$q_{viscoso} = \frac{r_v^2 I P_v r_v}{16 m_v l_{eff}} \quad (52)$$

1.3.8. Resistencia térmica de un TPTC

Es necesario considerar la transferencia de calor y las caídas de temperatura en un TPTC para poder predecir su funcionamiento. El calor puede ser retirado del TPTC por conducción, por convección y por radiación. Las caídas de temperatura que básicamente se van a experimentar van a ser por conducción.

El sistema se puede modelar por medio de resistencias térmicas y su equivalente con circuitos eléctricos, tal como se muestra en la figura 7.

Los diferentes tipos de resistencias térmicas a lo largo del tubo son explicadas a continuación:

- R_p = Resistencia del tubo.
- R_w = Resistencia del líquido y la malla combinados.
- R_i = Resistencia de la interfase entre líquido y vapor.¹
- $R_{v,a}$ = Resistencia del vapor de la sección adiabática.
- R_{ext} = Resistencia externa.

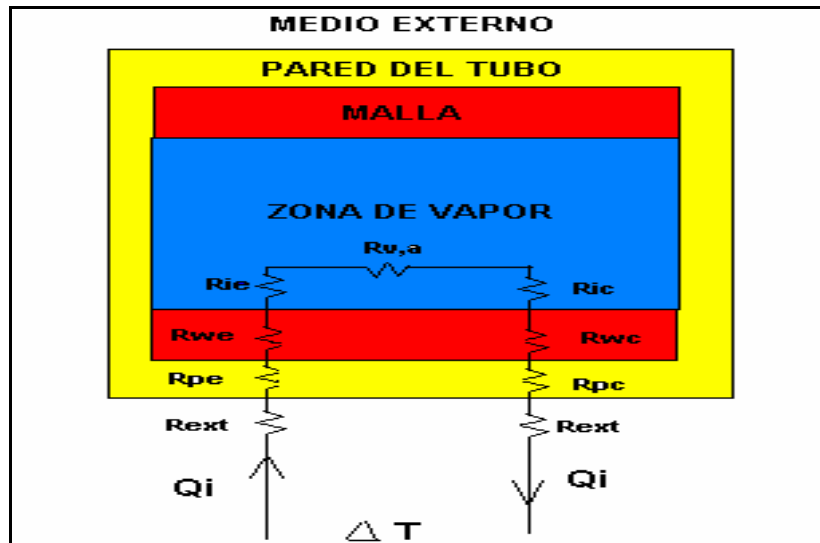


Ilustración 7. Equivalente térmico de un TPTC

Los sufijos “e”, “c” y “a” se refieren al evaporador, condensador y sección adiabática respectivamente.

Como se puede observar R_p , R_w y R_{ext} juegan un papel importante a la hora de calcular la resistencia térmica. Las resistencias en la sección adiabática se pueden despreciar ya que su valor es del orden de 10^{-8} °C/W, por el contrario, las demás resistencias térmicas son del orden de 10^3 °C/W.

La resistencia radial de la pared del tubo puede ser obtenida por medio de la siguiente expresión:

$$R_p = \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi L_{e/c} k_{eff}} \quad (53)$$

Donde k_{eff} se refiere a la conductividad térmica de la pared del TPTC, d_o es el diámetro del TPTC y d_i es el diámetro interno del contenedor.

Una expresión para la resistencia térmica equivalente del líquido y malla combinado es:

$$R_w = \frac{d_0}{k_w A_{e/c}} \quad (54)$$

Donde $A_{e/c}$ es el area del evaporado o condensador.

Cuando la malla y el fluido se encuentran en paralelo se utiliza la siguiente ecuación para la conductividad térmica:

$$k_w = (1 - e)k_s + ek_l \quad (56)$$

Y en serie

$$k_w = \frac{1}{\frac{(1 - e)}{k_s} + \frac{e}{k_l}} \quad (57)$$

Donde k_l conductividad térmica fluido, k_s es la conductividad térmica malla y e es la relación del líquido por volumen total de la malla.

1.4. DIFERENTES TIPOS DE TPTC

Han surgido una gran cantidad de tipos y formas de construcción de TPTC a través del tiempo que depende especialmente de la necesidad que se tiene, estos pueden ser:

- **TPTC de generador de calor y disipador separados:** Debido a la gran conductividad térmica y a que su sección intermedia se encuentra aislada térmicamente, este tipo de TPTC permite transportar calor a distancias considerables sin ocasionar pérdidas a través del tubo. Es utilizado en aplicaciones donde disipar el calor cerca al dispositivo puede generar ciertos inconvenientes en su funcionamiento. Es muy frecuente observarlos en fuentes de potencia o dispositivos que generen grandes cantidades de calor.
- **Temperatura variable:** Este dispositivo mantiene la temperatura constante en lugares donde esta varía ampliamente. Es usado para reducir gradientes de temperaturas entre áreas de calor diferentes, generando un equilibrio térmico en toda la superficie. Es usado frecuentemente en satélites para mantener la temperatura de su superficie constante.
- **Transformación de flujo de calor:** Tiene una gran aceptación en reactores termoiónicos debido a que la generación de energía de este tipo depende de la diferencia de temperatura entre el emisor y el colector. El TPTC debe mantener la temperatura en el reactor estable de tal modo que pueda trabajar eficientemente.
- **Control de temperatura:** Son utilizados principalmente los TPTC de conductancia variable, es frecuente su uso en naves espaciales donde es necesario hacer un estricto control de temperatura.

- **Diodos térmicos y switches:** Se utilizan cuando solo se necesita transportar calor en una dirección.

1.5. APLICACIONES DE TPTC

Las aplicaciones más usuales de los TPTC son:

- **El Moldeado e inyecciones para moldes:** El proceso de moldeado de aleaciones de metal o plástico consiste en rellenar dentro de un molde con el material en estado líquido a una alta temperatura para luego ser enfriado y solidificado. Cuando se implementa un TPTC en el proceso, el material se solidifica a mayor velocidad de lo normal.
- **Vehículos espaciales:** Las aplicaciones mas comunes donde se hace uso de los TPTC son las siguientes:

Temperatura uniforme: Es necesario mantener la temperatura uniforme en la estructura de satélites y naves. Se coloca el evaporador en la zona calentada por el sol y el condensador en la cara fría, es decir, en la cara donde no cae el sol de tal forma que se produzca un equilibrio térmico en la estructura para que no se vea afectada por las temperaturas extremas. En este tipo de aplicación es común utilizar el TPTC de control de temperatura.

Control de temperatura: Los TPTC de conductancia variable ofrecen control de temperatura para estrechos márgenes de temperatura. Es importante debido a que los componentes electrónicos pueden afectarse debido a los cambios de temperaturas que se encuentran en el espacio. También se puede utilizar como radiador ya que este tipo de TPTC se puede mantener una temperatura constante.

Fuentes de potencia nuclear: Se utiliza principalmente para tener un enfriamiento moderado, remover el calor del reactor a la temperatura de emisor y eliminar el problema de cambios térmicos a lo largo del emisor y el colector.

- **Conservación de energía:** Debido al alza de precio de los diferentes tipos de generación de energía a través del tiempo es necesario mirar otro tipo de alternativa de ahorro. Por eso actualmente los TPTC pueden ser una gran solución para la conservación de energía. Un ejemplo claro es un aire acondicionado, el evaporador de TPTC es colocado en contacto con aire, luego el calor es transferido al condensador produciendo que el aire dentro de la habitación se vuelva mas agradable. Es una gran alternativa para ponerlos en automóviles, se puede disminuir la cantidad de combustible que este consume, usando el clima o el mismo calor que produce el automóvil.
- **Generación de potencia termoiónica:** En la generación de potencia termoiónica es muy importante debido a la necesidad de conservar la

temperatura del generador. Estos TPTC están diseñados para alcanzar temperaturas de hasta 1600 °C. El generador funciona de la siguiente manera: los electrones son emitidos por el emisor, estos cruzan el espacio del electrodo hasta la superficie del colector donde son enfriados. Los electrones son devueltos al emisor por medio de la carga eléctrica que se generó. Este proceso es básicamente conversión de la energía térmica en energía eléctrica.

Por eso el TPTC en este caso puede usarse de cualquiera de dos formas, conectado al generador de calor del emisor o conectado como un radiador para rechazar el calor del colector. “Los TPTC de litio y plata son usados para conducir calor del emisor, los de sodio y potasio son usados para enfriar el colector”⁵.

1.6. TPTC EN APLICACIONES ELECTRÓNICAS

Debido al auge que ha tenido la electrónica en los últimos tiempos y a su cantidad de aplicaciones, los TPTC son una alternativa atractiva de enfriamiento que se espera que llegue próximamente al país debido a que su precio ha bajado notablemente a través del tiempo y su eficiencia comparada con otros disipadores de calor es superior.

En aplicaciones electrónicas tienen tres tipos de funciones básicas como son:

- Transportar el calor generado por una fuente.
- Bajar el gradiente de temperatura del dispositivo electrónico.
- Controlar la temperatura.

En este tipo de aplicaciones es importante considerar la geometría del sistema. Tomando en cuenta esta característica se pueden agrupar los TPTC en tres categorías de la siguiente manera:

- **TPTC tubular:** Debido a que su forma es la de tubo largo es usado para transferir calor a una sección remota. Este tipo de TPTC tienen 4 formas diferentes de disipar el calor como son:
 - Por medio de una aleta sólida.
 - Por convección forzada por medio de un ventilador.
 - Por inmersión en un ambiente frío.
 - Por medio de otro TPTC.

En aplicaciones electrónicas el peso y el tamaño son importantes en el momento de considerar un diseño de disipación de calor. Este tipo de TPTC tiene la propiedad de poder ser doblado porque son producidos con materiales flexibles. Otra cualidad que tienen es que pueden ser acoplados a varios dispositivos electrónicos haciendo contacto directo con el tubo ya sea colocado los dispositivos electrónicos a través del tubo o montando los componentes sobre un plato donde son ubicados los elementos.

- **TPTC plano:** Es el mas usado en enfriamiento en circuitos electrónicos y también en unidades de alta potencia y semiconductores y transistores de tamaño pequeño. Las aplicaciones mas frecuentes son la de enfriar un arreglo de elementos consecutivos o mantener la temperatura de un componente con superficie plana. Actualmente se hacen estudios sobre la posibilidad de montar los elementos sobre la superficie del TPTC.
- **Sistemas de contacto directo:** Uno de los problemas de esta configuración al ser incorporada es que produzca problemas de interferencias convirtiéndose en una resistencia en paralelo ocasionando fallas en el circuito. Una solución a este problema es hacer un TPTC plano que tenga un contacto leve con los elementos que generan calor.

Otro método es hacer un TPTC y colocar en sus paredes los elementos a ser enfriados e instalar en su interior una reserva líquida para que llene las paredes con el líquido que contiene los elementos a ser enfriados.

“Los TPTC usados en aplicaciones electrónicas son de alrededor de 1mm a 9mm de espesor y puede retirar cantidades energía por unidad de tiempo que oscilan entre los 12.5W a 150W”⁵.

Es necesario para un diseño que el TPTC tenga aislamiento eléctrico en la pared. Los materiales mas usados como pared son el vidrio, y cobre, un material cerámico como malla y como fluido agua destilada.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Todos los componentes electrónicos, desde microprocesadores hasta elementos de consumo de alta potencia, generan calor que es necesario retirar para mantener una operación apropiada. Los diseños electrónicos de los últimos años poseen gran capacidad de trabajo en pequeños espacios y esto genera calor que puede perjudicar el desempeño o su tiempo de vida, por lo tanto la disipación de calor se vuelve un factor importante de diseño.

Muchos de los componentes electrónicos hoy en día requieren dispositivos de enfriamiento de mayor capacidad que las aletas y los ventiladores. Debido a esto en los últimos años, para retirar el calor de un dispositivo electrónico de forma rápida y efectiva es necesario el uso de un TPTC. El TPTC es conocido por ser un dispositivo de gran desempeño, su disipación de calor es veloz y controla la temperatura de forma eficiente. Además es un dispositivo que no consume energía para su funcionamiento ni posee partes móviles.

El propósito de este proyecto es construir un circuito electrónico prototipo que genere calor por autocalentamiento y que este sea cuantificable en función del tiempo; se dispondrá de un TPTC para retirar esa cantidad de calor y mantenerlo a una temperatura normal de trabajo. Se comparará con otros dispositivos de enfriamiento electrónico para mirar la mejor alternativa en

aspectos como eficiencia térmica, costo, funcionalidad, confiabilidad, entre otros.

3. JUSTIFICACIÓN

El gran crecimiento en la industria electrónica está orientado a la elaboración de circuitos complejos en un espacio reducido como es el caso de los computadores personales, instrumentos de medidas, equipos de recepción y emisión de datos, automóviles, equipos médicos y equipos de uso doméstico.

Al hacer más pequeños estos dispositivos electrónicos se tiene que pagar un precio alto en cuanto a la generación de calor de sus elementos, el cual ha corto plazo puede afectar su correcto funcionamiento, por lo tanto la disipación de calor es un elemento importante en el diseño.

Actualmente es necesario también enfocar el estudio de la electrónica en dar soluciones a las formas de disipar el calor de sus componentes ya que es una de las principales causas de fallas en los equipos. La universidad es una de las principales fuentes de investigación que se tienen para dar soluciones eficientes a este tipo de necesidades.

En las últimas décadas se observa que para la disipación de calor se utilizan elementos sencillos como puede ser un ventilador o una aleta. Pero estos además de ocupar un espacio considerable, han sido insuficientes debido a

que la cantidad de calor que se generan en los elementos electrónicos es grande; además, son dispositivos que a corto plazo pueden fallar sacrificando principalmente el equipo electrónico. Entonces era necesario implementar un dispositivo que mantuviera a una temperatura adecuada los elementos electrónicos para un correcto funcionamiento con baja posibilidad de falla, como es el TPTC.

El TPTC se ha vuelto un instrumento de disipación de calor más importante en los últimos tiempos, no solo en el ámbito electrónico, sino también en la industria, los viajes espaciales y la generación de energía, entre otros.

En la electrónica, el TPTC, se ha vuelto un instrumento de gran importancia debido a que es un elemento sencillo, fácil de manejar e instalar, gran durabilidad, no consume potencia eléctrica y tal vez lo mas importante, no perjudica el correcto funcionamiento del equipo.

Este proyecto va enfocado al estudio y utilización de los TPTCs como una alternativa novedosa y eficiente en el control de la temperatura en el diseño de los circuitos electrónicos, explicando su funcionamiento de una forma sencilla y haciendo pruebas de su eficiencia comparándolo con otros dispositivos de enfriamiento.

Hasta la fecha no se había realizado un proyecto acerca de los TPTC en la universidad y considero que es una excelente oportunidad para que futuras

generaciones no piensen que los procesos termodinámicos solamente son necesarios para ingenieros mecánicos, físicos y químicos y observen su importancia en el momento de diseño, sobre todo en estos momentos donde se está debatiendo sobre la reforma del pensum académico de pre-grado y dejando tal vez en la mente rondando la idea, más adelante, en abrir una especialización en el área de la transferencia de calor aplicada a la electrónica.

4. OBJETIVOS

4.1. GENERAL

Aplicar los TPTC (Tubos Para la Transferencia de Calor) como una alternativa eficiente en el enfriamiento de dispositivos electrónicos.

4.2. ESPECÍFICOS

1. Comparar el perfil térmico a través del tiempo de un sistema electrónico de potencia antes y después de instalar un TPTC.
2. Comparar la eficiencia térmica de un TPTC con otros dispositivos de enfriamiento electrónico como aletas y ventiladores (convección natural y forzada).
3. Crear un programa que permita modelar y simular el comportamiento de un TPTC en función de la temperatura.

5. METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO

5.1. EQUIPOS UTILIZADOS

- Cámara termográfica.
- Amplificador de potencia.

5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS

5.2.1. Cámara termográfica

Es el equipo más importante y se usará con mayor frecuencia en este trabajo de grado y es presentado en la ilustración 8. Para su correcto funcionamiento se requiere de muchos cuidados y se recomienda leer el manual para el usuario antes de su operación porque en este trabajo puede no hacerse un gran énfasis en los cuidados del equipo o del usuario. La ventaja de este equipo es la posibilidad de tomar temperaturas en tiempo real.

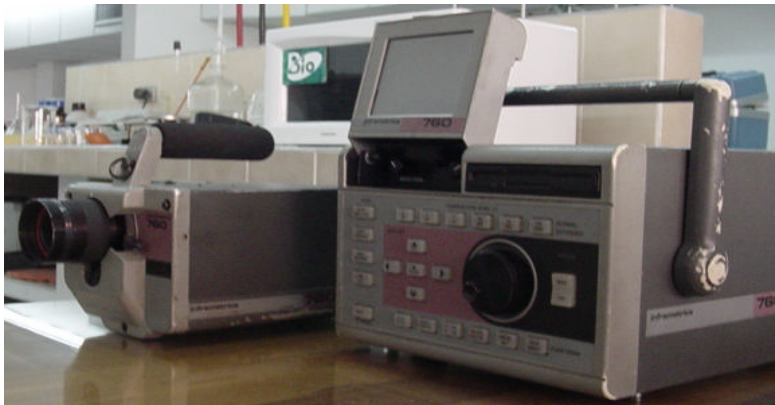


Ilustración 8. Cámara Termográfica

5.2.1.1. Panel de control

El panel de control permite enfocar y adquirir datos de temperatura sobre la imagen que se observa. Para entender su funcionamiento y en que se diferencia cada una de sus funciones, se ha dividido en cinco subgrupos de la siguiente manera:



Ilustración 9. Panel de Control

Control de funciones:

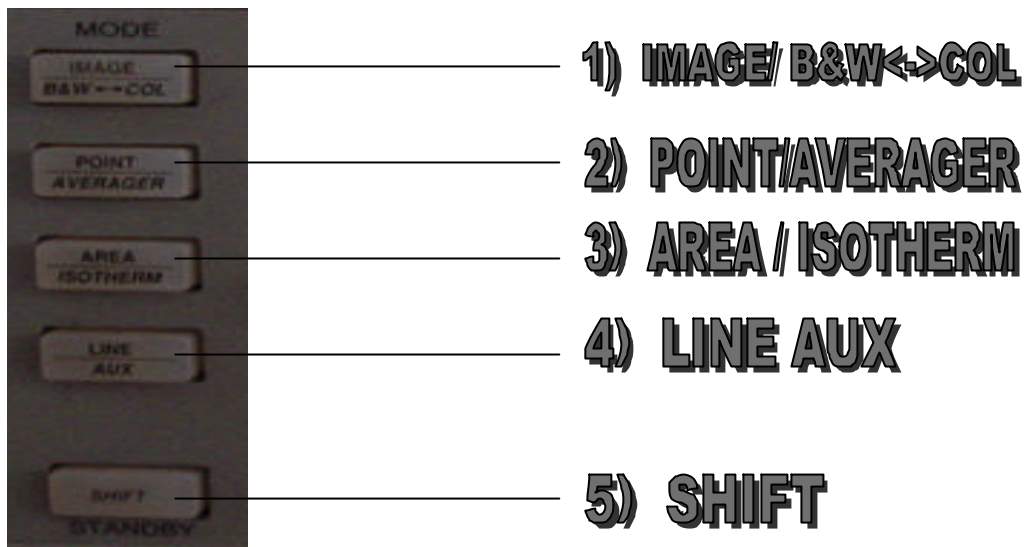


Ilustración 10. Control de funciones

Consta de 5 teclas como lo muestra la ilustración 10. La tecla 5 se encarga de poner la función alterna, es decir, la que se encuentra escrita en la parte inferior del botón, por ejemplo, si se oprime 5-1 al tiempo se activa la función BW <-> COL cuya función se explicará más adelante. La tecla 1 (IMAGE) se encarga de cargar la imagen que se encuentra enfocada por el escáner, cuando se oprime la tecla 5-1 al tiempo (BW <-> COL) cambia la imagen de blanco y negro y muestra una escala de colores rojos, grises y azules. La tecla 2 (POINT) señala la temperatura en un punto específico y cuando se oprime las teclas 5-2 al tiempo (AVERAGER) la temperatura promedio de los objetos que se encuentran en pantalla. La tecla 3 (AREA) tiene la función de calcular la temperatura de un área específica encerrada en un recuadro y cuando se oprime al tiempo la tecla 5-3 (ISOTHERM) muestra la temperatura, dependiendo del usuario, de todos los objetos que se encuentran a la misma temperatura. Por último la tecla 4 (LINE AUX) muestra la temperatura promedio a la que se encuentra un plano en especial.

Control de posición del cursor:



Ilustración 11. Panel de control de posición

Como se observa en la ilustración 11, el control de posición de cursor posee 4 teclas y son las encargadas, como su nombre lo indica, de manejar el cursor de medida cuando la cámara de encuentra en las funciones POINT, AREA, ISOTHERM y LINE AUX, señalando en la parte inferior de la pantalla, la temperatura que se encuentran (dependiendo de la función) los cuerpos. La tecla (CENTER) ubica el cursor de medición de temperatura en todo el centro de la imagen.

Control de imagen:



Ilustración 12. Panel de control de la imagen

El control de imagen posee 5 teclas como se observa en la ilustración 12, la tecla 6 (SAVE TO DISK) se encarga de salvar de salvar la imagen en un disquete para luego poder ser estudiada, la tecla 7 (RECALL FROM DISK) trae una gráfica grabada en un disquete con anterioridad, la tecla 8 (FREEZE) se encarga de congelar la imagen, cuando se oprime las teclas 5-8 (WRITE) se descongela, al oprimir la tecla 9 (RCL) trae una gráfica colocada en la memoria volátil de la cámara, al oprimir 5-9 (WRITE) al tiempo la salva en la memoria volátil que posee la cámara, la tecla 10 (SETUP) muestra la configuración de la cámara como por ejemplo las unidades de medida de la temperatura, la escala expandida, la hora y fecha, entre otras y por último al oprimir 5-10 (REBOOT) coloca los valores iniciales de configuración y borra los valores configurados durante la medición de temperatura.

Control de proximidad:

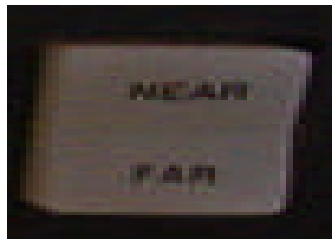


Ilustración 13. Control de proximidad

Como se observa en la ilustración 13, posee 2 teclas FAR y NEAR y su función es alejar o acercar el lente del escáner por medio de una combinación de espejos.

Control de margen de temperatura:**Ilustración 14. Control de SPAN****Ilustración 15. Perilla para cuadrar temperatura.**

El margen de temperatura se cuadra por medio de los botones que se encuentran en la ilustración 14. Su función consiste en cuadrar un margen de temperatura apropiado para tomar los datos de temperatura, estos rangos de temperatura van de los 5 grados a 1000 grados con respecto a la temperatura de referencia, para diferencia de temperaturas extremas (SPAN entre 20-1000) hay configurar en el SETUP esa extensión de medida. La temperatura de referencia se cuadra con la perilla que se encuentra en la ilustración 15.

5.2.1.2. Escáner



Ilustración 16. Escáner

El escáner es el dispositivo que requiere mayor cuidado en la cámara, el capta por medio de una lente de germanio, sensible a la temperatura de los cuerpos, la imagen y la envía al panel de control donde es procesada. Contiene un juego de lentes que permite que el usuario, por medio del panel de control, tenga la posibilidad de acercar o alejar la imagen. Una recomendación por parte del fabricante es que el escáner debe ir bien conectado al panel de control.

5.2.2. Amplificador de potencia

La idea de hacer este tipo de circuito es mantener un transistor en su región activa para que consuma la mayor potencia posible. El circuito a utilizar es básico con el fin de tener un control sobre el dispositivo y saber cual es la potencia que consume a la salida.

El esquema del circuito se muestra en la ilustración 17. Se observa que transistor se alimenta con un “voltaje puerta-surtidor” de 12V a diferentes frecuencias y una fuente de alimentación (V_{cc}) de 5V. Se pondrán cuatro resistencias de 1 Ω en paralelo entre la fuente de alimentación y el drenador del transistor con capacidad de 10 W cada una, es decir, una resistencia equivalente de 0.25 Ω o 0.5 Ω para potencia alta y baja respectivamente .

El transistor MOSFET IRFP450 de potencia tiene una “resistencia de drenador-surtidor” (R_{ds}) equivalente de 0.33 Ω . En el transistor habrá una “corriente de drenador – surtidor” de 8.62 A para alta potencia. Para el caso de baja potencia se realizará con el mismo circuito, solo que al variar la resistencia de carga su corriente será de 6.0241 A.

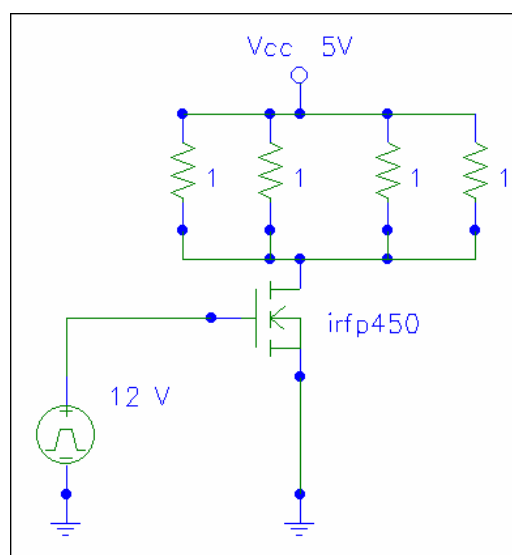


Ilustración 17. Amplificador de Potencia

Se alimentará con un voltaje V_{gs} de 12V en continua, a 10Hz, 100Hz y 1KHz con un ciclo de trabajo del 53.33% con el propósito que el transistor trabaje

como un switch. El circuito es controlado por medio de un oscilador LM555 a un voltaje pico de 5V y controlando la frecuencia de operación por medio de la instalación de varios condensadores. A la salida se conecta un optocoplador que amplifica la señal a 12V a la misma frecuencia y ciclo de trabajo. También corrige los picos indeseables de la señal que puede perjudicar el funcionamiento del transistor.

La idea de este circuito es simular el funcionamiento de un dispositivo digital de alta potencia. La ilustración 18 muestra el circuito implementado.

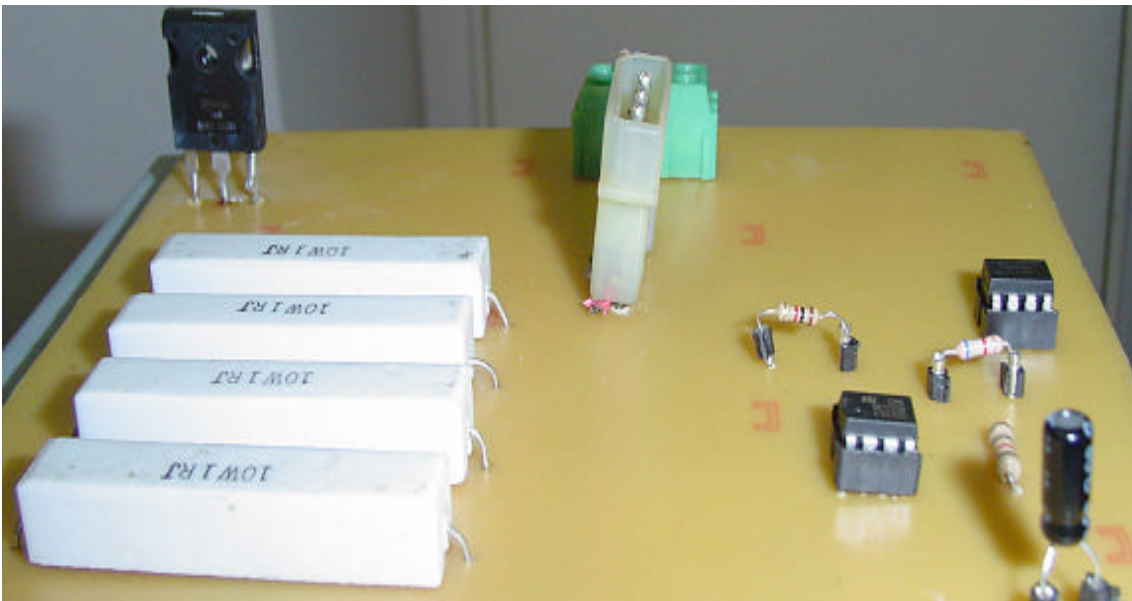


Ilustración 18. Circuito de Potencia Implementado

5.3. DISEÑO DEL EXPERIMENTOⁱ

Para el diseño del experimento se hicieron diferentes pruebas para determinar la eficiencia del TPTC con otros disipadores de calor a baja y alta potencia para comparar el perfil térmico a través del tiempo en un sistema de potencia antes y después de instalar un TPTC a diferentes frecuencias y en posición vertical o horizontal con el fin de observar el margen de disipación de calor dependiendo de su posición.

Las variables que afectan el funcionamiento del transistor son las siguientes:

- Temperatura ambiente.
- Potencia del transistor.
- Frecuencia de trabajo del transistor.
- Tipo de disipador de calor.

Para la determinación y comparación de la eficiencia de los disipadores, se acopló cada disipador al transistor a una frecuencia de operación de 0 Hz. Luego se tomo la temperatura cuando esta se estabilizaba y se tomaban las diferentes temperaturas.

Para la determinar el perfil térmico para el TPTC se acopló este disipador en posición verticalⁱⁱ y horizontal al transistor tomando temperaturas cada 25 segundos a diferentes frecuencias de operación.

ⁱ Para mejor entendimiento, es recomendable tener un conocimiento previo sobre diseño de experimentos de múltiples variables.

5.3.1. Determinación y comparación de la eficiencia de los disipadores.

La eficiencia de un disipador de calor se puede determinar por medio del análisis de la temperatura antes y después de implementar el disipador.

Se mantendrán los siguientes factores fijos:

- Temperatura ambiente ($T_a = 25^\circ\text{C}$).
- Frecuencia de trabajo del transistor ($F = 0$)ⁱⁱⁱ.

Los factores que variarán son:

- Tipo de disipador de calor.
- Potencia del transistor.

El factor “Tipo de disipador “constará de cuatro niveles:

- Sin disipador
- Aleta.
- Ventilador.
- TPTC.

ⁱⁱ Posición vertical se refiere al evaporador y zona adiabática en posición vertical y el condensador en posición horizontal.

ⁱⁱⁱ A frecuencia cero el transistor consume la mayor potencia.

La hipótesis consiste en determinar cual de los 3 disipadores de calor es más efectivo por medio de la temperatura promedio del transistor. La hipótesis nula y la alternativa correspondiente a este experimento serán:

H_d : Todos los disipadores tienen la misma eficiencia.

A_d : Por los menos dos disipadores tienen una eficiencia diferente.

El factor "Potencia" constará de dos niveles:

- Baja potencia (11.97 W).
- Alta potencia (24.52 W).

Con este experimento se podrá determinar si en ambos factores la eficiencia térmica va a ser similares. La hipótesis nula y la alternativa correspondiente a este experimento serán:

H_p : La eficiencia es la misma a cualquier potencia.

A_p : La eficiencia es diferente para ambas potencias.

También se determinará si hay interacción entre estos dos factores o si tienen alguna relación. La hipótesis nula y la alternativa correspondiente a este experimento serán:

H_{dp} : La interacción entre estos factores sobre la temperatura es la misma.

A_{dp} : La interacción es diferente.

Los datos serán consignados en la tabla 2.

POTENCIA	SIN DISIPADOR	ALETA	VENTILADOR	TPTC
BAJA				
ALTA				

Tabla 2. Tabla de toma de datos

Para cada una de las pruebas se utilizará el mismo transistor, la temperatura ambiente se asumirá constante, y la frecuencia de operación cero. Se tomará datos de temperatura del transistor de forma aleatoria durante 10 minutos de operación del transistor por medio de la cámara termográfica. Cuando sea apagado el transistor se esperará el tiempo que sea necesario para que el transistor llegue a la temperatura ambiente para evitar problemas de posible acumulación de calor.

Pruebas durante la experimentación:

Se montará el circuito en una ambiente donde la temperatura no varíe de forma brusca durante el día. También se tendrá sumo cuidado que no haya otra forma de disipación de calor por convección forzada que pueda afectar el experimento.

Para el experimento de la determinación de temperatura para los factores sin disipador, aleta, ventilador y TPTC en posición vertical se implementarán como se observa en las ilustraciones 19, 20,21 y 22 respectivamente.

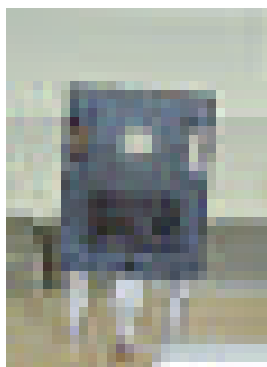


Ilustración 19. Transistor sin Disipador

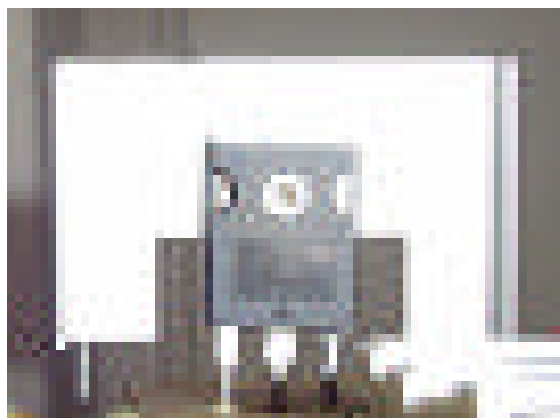


Ilustración 20. Transistor con Aleta



Ilustración 21. Transistor con Ventilador

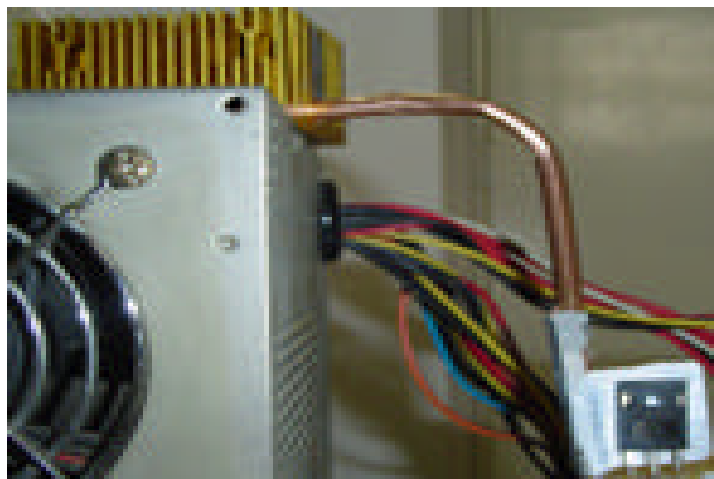


Ilustración 22. Transistor con TPTC vertical

Para este caso no se implementa la configuración con TPTC horizontal debido a que el TPTC vertical, tiene la mejor eficiencia como se observaba en el capítulo 1.

Para comprobar si las hipótesis son ciertas se recurrirá a la elaboración de una ANOVA que se observa en la tabla 3.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	Fo
DISIPADOR				
POTENCIA				
INTERACCIÓN				
ERROR				
TOTAL				

Tabla 3. ANOVA disipador potencia

Luego se observará si el tamaño de la muestra para cada una de las hipótesis es la correcta.

Pruebas después de la experimentación:

Ahora es necesario comparar las eficiencias entre un disipador y otro. Se recurrirá al “Test de Rango Múltiple de Duncan”. Wilfrido Moreno dice con respecto a este test lo siguiente:”... el test de Duncan es superior a los demás para detectar diferencias entre pares de medias”¹⁴. Con este test se podrá comparar si hay una relación entre cada uno de los disipadores.

Con este promedio se calculará la eficiencia térmica sobre cada uno de los transistores con disipador con respecto al experimento que no lo tiene. Este experimento se realizará para baja y alta potencia.

5.3.2. Perfil térmico a través del tiempo de un sistema de potencia antes y después de instalar un TPTC a diferentes frecuencias.

Es posible determinar un modelo matemático para mirar el funcionamiento de un TPTC a través de las muestras de temperatura correspondiente a unos tiempos y a frecuencias cero, bajas, medias y altas.

Para este experimento se mantendrá fijos los siguientes factores:

- Temperatura ambiente ($T_a = 25^\circ\text{C}$).
- Corriente de drenador – surtidor. ($I_d = 8.26 \text{ A}$)
- Ciclo de trabajo (53.33%).

Los factores variantes serán:

- Frecuencia de trabajo del transistor (Cualitativo).
- Tiempo (Cuantitativo)

El factor “Frecuencia de trabajo del transistor “constará de 4 niveles:

- Cero.
- Baja frecuencia (10 Hz).
- Frecuencia media (100 Hz).
- Alta frecuencia (1Khz).

El factor "tiempo" constará de 10 niveles:

- T_1 (0 seg.)
- T_2 (25 seg.)
- T_3 (50 seg.)
- T_4 (75 seg.)
- T_5 (100 seg.)
- T_6 (125 seg.)
- T_7 (150 seg.)
- T_8 (175 seg.)
- T_9 (200 seg.)
- T_{10} (225 seg.)

La prueba consiste en determinar como trabaja el TPTC a través del tiempo y a ciertas frecuencias en un sistema de alta potencia. La hipótesis correspondiente a la frecuencia de trabajo del transistor será:

H_f : La temperatura a diferentes frecuencias es la misma.

A_f : La temperatura en por lo menos en dos frecuencias diferentes son diferentes.

Y la hipótesis correspondiente al tiempo:

H_t : El transistor tiene la misma temperatura a través del tiempo.

A_t : Por lo menos en dos tiempos diferentes el transistor tiene diferente temperatura.

Los datos se consignarán en la tabla 4.

TIEMPO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
00:00			
00:25			
00:50			
01:15			
01:40			
02:05			
02:30			
02:55			
03:20			
03:45			

Tabla 4. Toma de datos

Se utilizará el mismo transistor, la temperatura ambiente será constante, la corriente que pasará por el transistor será la misma. Se tomará 6 datos de temperatura del transistor a una cierta frecuencia cada 25 segundos por medio de la cámara termográfica. Así como en el experimento pasado, tan pronto sea apagado el transistor se esperará el tiempo que sea necesario para que el transistor llegue a la temperatura ambiente para evitar problemas de posible acumulación de calor.

Pruebas durante la experimentación:

Como la idea de este experimento es generar una función que muestre como es el funcionamiento del TPTC a través del tiempo a diferentes frecuencias. Entonces es necesario recurrir a la elaboración de un modelo exponencial ya

que es conocido por trabajos anteriores que la temperatura trabaja de una forma exponencial. Para comprobar si las hipótesis son ciertas se recurrirá a la elaboración de una tabla ANOVA como se observa en la tabla 5.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	Fo
DISIPADOR				
TIEMPO				
INTERACCIÓN				
ERROR				
TOTAL				

Tabla 5. ANOVA de temperatura con respecto al tiempo

Se estimará el grado de relación de cada una de los factores y de la interacción entre ellos.

Para el experimento de la determinación de temperatura para los factores sin disipador, TPTC en posición horizontal y TPTC en posición vertical se implementarán como se observa en las ilustraciones 23, 24 y 25 respectivamente.

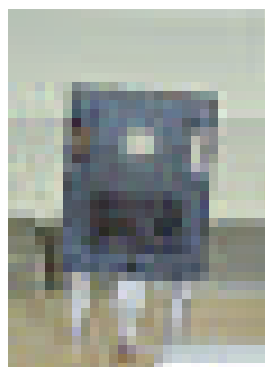


Ilustración 23. Transistor sin Disipador

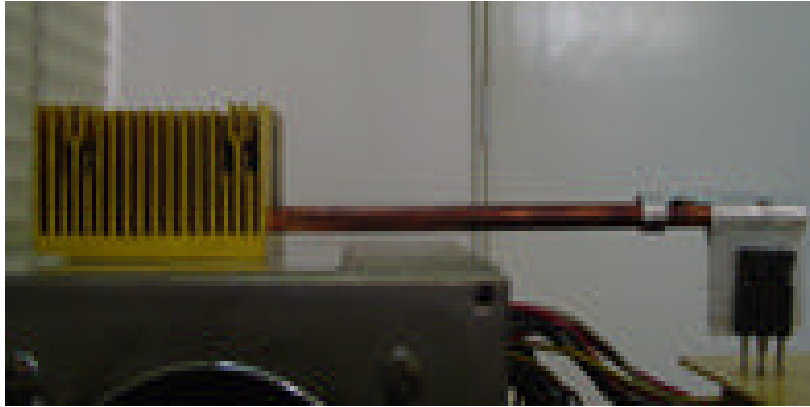


Ilustración 24. Transistor con TPTC horizontal

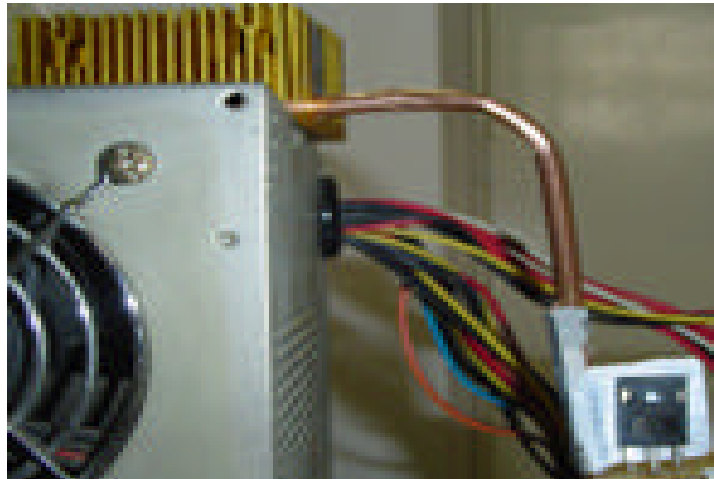


Ilustración 25. Transistor con TPTC vertical

Pruebas después de la experimentación:

Se aproximó el comportamiento del disipador antes y después de instalar el TPTC al modelo exponencial que se observa en la ecuación (58).

$$\Delta T = A (1 - e^{-t/\tau}) \quad (58)$$

Donde t es el tiempo, τ es el tiempo de asentamiento y A la temperatura máxima.

Esta prueba se realiza tanto para el transistor con el TPTC en posición vertical y horizontal en el transistor así como el caso de ausencia de este a diferentes frecuencias.

Se graficará las curvas correspondiente a cada una de las frecuencias para comparar a que velocidad el TPTC puede dispar calor en el transistor.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. COMPARACIÓN DEL PERFIL TÉRMICO ANTES Y DESPUÉS DE UTILIZAR EL TPTC

Siguiendo el procedimiento que se comentó en el capítulo anterior, se tomaron los datos de temperatura a través del tiempo cada 25 segundos de forma exacta durante un tiempo de 3:45 minutos, el cursor de la cámara apuntaba en el lugar donde la temperatura era más alta en el transistor. Como se mencionaba, se realizó las pruebas para diferentes frecuencias (0 Hz, 10Hz, 100 Hz y 1 KHz) con el TPTC en posición vertical, horizontal o en ausencia de este.

Los resultados que se obtuvieron se comentarán a continuación para cada uno de los tipos de frecuencia.

6.1.1. Continua (0 Hz)

Para este caso se aplicó voltaje continuo a la puerta del transistor. Los datos de temperatura se muestran en la tabla 6.

La temperatura del transistor, cuando este no se encontraba en operación, era de 25 °C. Cada vez que se apagaba el transistor para tomar sus datos de temperatura se esperaba a que retomara esa temperatura para poder volver a encenderlo. Debido a las condiciones del cuarto, la temperatura en el laboratorio era constante porque contaba con un control de temperatura, lo que ocasionaba que fuera muy favorables las condiciones y no se produjeran cambios bruscos en la temperatura.

TIEMPO	SIN DISIPADOR		TPTC HORIZONTAL		TPTC VERTICAL	
00:00	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
00:25	106	105	99	98	90	90
	105	105	98	99	90	90
	105	105	98	98	89	89
00:50	152	153	135	136	121	122
	153	152	136	136	122	121
	152	152	136	135	122	122
01:15	179	180	155	153	135	136
	180	180	155	154	136	136
	180	179	154	154	136	136
01:40	194	194	164	164	142	143
	194	195	164	165	143	142
	195	195	164	164	143	143
02:05	203	203	169	169	144	144
	202	202	169	169	145	145
	203	203	169	169	145	145
02:30	206	207	171	170	146	147
	208	207	171	171	147	146
	207	207	170	170	147	146
02:55	210	210	173	173	149	149
	210	210	172	174	149	149
	210	209	172	173	149	148
03:20	212	212	174	173	149	149
	212	213	173	173	149	149
	213	212	173	174	149	149
03:45	213	214	175	175	148	149
	214	213	174	175	148	149
	214	214	174	176	149	149

Tabla 6. Datos obtenidos a 0 Hz

Para este experimento es necesario conocer el ΔT del transistor con respecto a la temperatura ambiente. Entonces los datos originales se restan en 25 para poder hacer una modelo de ΔT del Transistor Vs Tiempo de Operación.

Como se conoce, la temperatura tiene un crecimiento exponencial y llega a un momento donde se satura como el caso cuando se carga un condensador en un circuito RC. Para este caso se tomó como modelo la ecuación mostrada en la expresión (58).

$$\Delta T = A (1 - e^{-t/\tau}) \quad (58)$$

Donde t es el tiempo, τ es el tiempo de asentamiento y A la temperatura máxima.

Se utilizó el diseño de experimentos de múltiples factores propuesto por Wilfredo Moreno ¹⁴ para poder determinar el tamaño de la muestra.

Con los datos obtenidos, se realizó la ANOVA como se observa en la tabla 7.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	MEDIA DE CUADRADOS	Fo
TIEMPO	399999,1389	9	44444,34877	57,3311991
DISIPADOR	61284,13333	2	30642,06667	39,5268796
INTERACCIÓN	13953,97778	18	775,2209877	3185,83968
ERROR	36,5	150	0,243333333	
TOTAL	475273,75	179		

Tabla 7. ANOVA de experimento de tiempo y disipador

Para la determinación del tamaño de la muestra se basó con el criterio utilizado por Douglas Montgomery ¹⁵ para la determinación del tamaño de la muestra de efectos aleatorios. Se realizó para los factores de tiempo, disipador y la interacción entre ambos.

Los resultados de varianza se encuentran en la tabla 8.

ERROR	0,24333333
VARIANZA INTERACCIÓN	774,977654
VARIANZA TIEMPO	14556,3759
VARIANZA DISIPADOR	3064,18233

Tabla 8. Varianza de los diferentes factores

Por medio de la ecuación (59), se determina el valor de I que es un factor que indica, dependiendo de sus grados de libertad y por medio de las “curvas características de operación para el análisis de varianza del modelo de efectos aleatorios” ¹⁵ se halla la probabilidad de aceptar la hipótesis o como en probabilidad se conoce como β . Los resultados se encuentran en la tabla 9.

$$I = \sqrt{\left(1 + \frac{n S_i}{S}\right)} \quad (59)$$

?		V1	V2	β
INTERACCIÓN	56,443243	18	150	0,01
TIEMPO	244,584797	9	150	0,01
DISIPADOR	112,220899	2	150	0,01

Tabla 9. Error tipo II

Se puede observar que el tamaño de la muestra es suficiente para poder predecir algo estadísticamente aceptable porque el error tipo II para cada uno de los factores es pequeño.

Se prosigue a mirar si tienen efectos significantes.

	Fo	V1	V2	a	F a,v1,v2
INTERACCIÓN	3185,83968	18	150	0,01	2.04
TIEMPO	57,3311991	9	18	0,01	3.60
DISIPADOR	39,5268796	2	18	0,01	6.01

Tabla 10. Determinación de los Efectos Significantes

Como muestra la tabla 10 se puede observar que el tiempo tiene diferencia significativa sobre la temperatura, así como el disipador y la interacción entre los dos. Este resultado era esperado porque son factores en los cuales influye de manera fuerte sobre la temperatura de operación del transistor.

Wilfredo Moreno ¹⁸ propone que se haga un polinomio, pero no me parece que sea un modelo que me pueda predecir como se va comportar a futuro, porque este es un modelo usado cuando crece de manera progresiva y nunca llega a una saturación fija, en cambio, la temperatura se comporta de manera que llega a un punto donde se satura.

Primero se restaron los 25 °C y se calculó la media de cada una de las muestras en su correspondiente tiempo y disipador. El tiempo se convirtió a segundos, como se observa en la tabla 11.

TIEMPO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
0	0	0	0
25	80,1666667	73,3333333	73,3333333
50	127,3333333	110,6666667	96,6666667
75	154,6666667	129,1666667	110,8333333
100	169,5	139,1666667	117,6666667
125	177,6666667	144	119,6666667
150	182	145,5	121,5
175	184,8333333	147,8333333	123,8333333
200	187,3333333	148,3333333	124
225	188,6666667	149,8333333	123,6666667

Tabla 11. Promedios Aritméticos

Para conocer el valor de A y de ? del modelo de la ecuación (58), fue necesario hacer de esa ecuación una línea recta para poder determinar los valores de esas 2 variables. La ecuación de la línea recta fue la siguiente:

$$- \operatorname{Ln} (A - \Delta T) = \frac{t}{t} - \operatorname{Ln} (A) \quad (60)$$

Se puede asemejar eso a la ecuación de una línea recta que se recuerda en la ecuación (61):

$$Y = A_1 * X + B_1 \quad (61)$$

Por lo tanto, $Y = -\operatorname{Ln}(A - ?T)$, $A_1 = 1/?$, $X = t$ y $B_1 = -\operatorname{Ln}(A)$. Como el valor de A no se conoce, entonces se asumió un valor de A (usualmente era la temperatura mas alta medida), luego se realizaba la regresión lineal y se iteraba hasta que el valor de A concordara entre el valor asumido y el valor resultante del intercepto con el eje Y con 2 cifras significativas. Así se realizó para todos los casos.

Se hallaron los valores del modelo como se observa en la tabla 12.

CONSTANTE DEL MODELO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
?	45,7120716	39,4527431	32,9096375
A	189,84	150,08	124,08

Tabla 12. Parámetros del Modelo

6.1.2. Baja frecuencia (10 Hz)

El procedimiento fue igual para el procedimiento en continua. Se alimentó la puerta del transistor con un voltaje de 12 V a 10 Hz. Los resultados se muestran en la tabla 13.

Se realizó la ANOVA como se observa en la tabla 14.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS LIBERTAD	MEDIA DE CUADRADOS	Fo
TIEMPO	192655,1611	9	21406,12901	35,2735583
DISIPADOR	43180,84444	2	21590,42222	35,5772413
INTERACCIÓN	10923,48889	18	606,8604938	1601,68459
ERROR	56,83333333	150	0,378888889	
TOTAL	246816,3278	179		

Tabla 13. ANOVA de experimentos de tiempo y disipador

Se desea saber si el tamaño de la muestra es lo suficiente grande para poder determinar el error tipo II que se comete. Se determinó el tamaño de la muestra

de efectos aleatorios para los factores de tiempo, disipador y la interacción entre ambos como se hizo en el caso anterior. Los resultados de la varianza se encuentran en la tabla 15.

TIEMPO	SIN DISIPADOR		TPTC HORIZONTAL		TPTC VERTICAL	
00:00	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
00:25	72	73	69	70	61	61
	71	74	70	69	61	61
	72	73	70	69	61	62
00:50	109	111	96	96	85	86
	110	112	96	96	86	85
	111	111	96	96	85	86
01:15	129	130	108	109	95	95
	129	130	109	109	95	95
	130	130	110	108	94	95
01:40	141	142	116	116	99	100
	142	143	116	115	100	100
	142	143	117	116	100	101
02:05	148	149	120	119	102	102
	149	149	119	119	103	102
	149	150	120	119	103	103
02:30	153	154	122	122	103	104
	154	156	121	121	104	103
	154	154	122	121	104	104
02:55	158	158	124	122	104	105
	158	159	123	122	105	104
	157	158	124	122	105	104
03:20	160	161	123	123	105	106
	160	161	124	123	106	105
	161	161	124	123	106	106
03:45	161	162	123	124	105	105
	161	162	124	124	106	106
	162	162	125	123	106	106

Tabla 14. Datos obtenidos a 10 Hz

ERROR	0,37888889
VARIANZA INTERACCIÓN	606,481605
VARIANZA TIEMPO	6933,08951
VARIANZA DISIPADOR	2159,00433

Tabla 15. Varianza de diferentes factores

Se determina el valor de F_0 como en el caso anterior. Los resultados se encuentran en la tabla 16.

?		V1	V2	?
INTERACCIÓN	40,0210518	18	150	0,01
TIEMPO	135,275558	9	150	0,01
DISIPADOR	75,4933898	2	150	0,01

Tabla 16. Error tipo II

Se puede observar que el tamaño de la muestra es suficiente para predecir algo estadísticamente aceptable porque el error es pequeño.

	F₀	V1	V2	a	F_{a,v1,v2}
INTERACCIÓN	1601,68459	18	150	0,01	2.04
TIEMPO	35,2735583	9	18	0,01	3.60
DISIPADOR	35,5772413	2	18	0,01	6.01

Tabla 17. Determinación efectos significantes

Como muestra la tabla 17, se puede observar que el tiempo tiene efecto significativo sobre la temperatura, así como el disipador y la interacción entre ellos dos.

Primero se restaron los 25 °C y se calculó la media de cada una de las muestras en su correspondiente tiempo y disipador. El tiempo se convirtió a segundos, los resultados se observa en la tabla 18.

TIEMPO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
0	0	0	0
25	47,5	44,5	44,5
50	85,6666667	71	60,5
75	104,666667	83,8333333	69,8333333
100	117,166667	91	75
125	124	94,3333333	77,5
150	129,166667	96,5	78,6666667
175	133	97,8333333	79,5
200	135,666667	98,3333333	80,6666667
225	136,666667	98,8333333	80,6666667

Tabla 18. Promedios aritméticos

Siguiendo el modelo de la ecuación (58), se hallaron los valores del modelo como se observa en la tabla 19.

CONSTANTE DEL MODELO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
?	55,0483292	40,7259818	38,6477254
A	139,04	99,19	80,9

Tabla 19. Parámetros del modelo

6.1.3. Media frecuencia (100 Hz)

El procedimiento fue igual a los efectuados con anterioridad, se alimentó la puerta del transistor con un voltaje de 12 V a 100 Hz. Los resultados se muestran en la tabla 20.

TIEMPO	SIN DISIPADOR		TPTC HORIZONTAL		TPTC VERTICAL	
00:00	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
00:25	72	72	69	69	62	63
	74	73	69	70	62	63
	73	73	69	70	62	62
00:50	111	112	96	96	86	85
	112	112	95	95	86	85
	112	111	96	95	85	85
01:15	130	129	108	107	96	95
	132	130	108	108	96	95
	130	130	107	107	96	95
01:40	142	141	114	114	100	100
	143	142	115	114	100	100
	141	141	113	114	100	99
02:05	149	149	117	117	104	103
	150	149	117	116	104	102
	149	148	117	116	104	103
02:30	154	155	120	118	105	104
	155	155	120	119	105	104
	155	155	119	119	104	104
02:55	158	158	120	119	105	104
	157	158	120	119	105	104
	157	158	119	119	105	105
03:20	161	160	121	119	106	105
	160	161	122	120	107	105
	161	161	121	120	106	106
03:45	162	161	122	120	106	106
	161	162	122	121	106	106
	161	162	122	120	106	106

Tabla 20. Datos obtenidos a 100 Hz

Se realizó la ANOVA como se observa en la tabla 21.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS LIBERTAD	MEDIA DE CUADRADOS	Fo
TIEMPO	188491,2	9	20943,46667	33,7808948
DISIPADOR	43684,81111	2	21842,40556	35,2308439
INTERACCIÓN	11159,63333	18	619,9796296	1680,66767
ERROR	55,33333333	150	0,368888889	
TOTAL	243390,9778	179		

Tabla 21. ANOVA de experimentos de tiempo y disipadores

Los resultados de varianza se encuentran en la tabla 22.

ERROR	0,36888889
VARIANZA INTERACCION	619,610741
VARIANZA TIEMPO	6774,49568
VARIANZA DISIPADOR	2184,20367

Tabla 22. Varianza de los factores

Se determina el valor de β como en el caso anterior. Los resultados se encuentran en la tabla 23.

?		V1	V2	β
INTERACCIÓN	40,995947	18	150	0,01
TIEMPO	135,519728	9	150	0,01
DISIPADOR	76,9547532	2	150	0,01

Tabla 23. Error tipo II

Se puede observar que el tamaño de la muestra es suficiente para poder predecir algo estadísticamente aceptable porque el error es pequeño.

	Fo	V1	V2	a	F a,v1,v2
INTERACCIÓN	1680,66767	18	150	0,01	2.04
TIEMPO	33,7808948	9	18	0,01	3.60
DISIPADOR	35,2308439	2	18	0,01	6.01

Tabla 24. Determinación de efectos significantes

Como muestra la tabla 24 se puede observar que el tiempo tiene efecto significativo sobre la temperatura, así como el disipador y la interacción entre ellos dos.

Primero se restaron los 25 °C y se calculó la media de cada una de las muestras en su correspondiente tiempo y disipador. El tiempo se convirtió a segundos, los promedios de temperatura para cada tiempo se observa en la tabla 25.

TIEMPO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
0	0	0	0
25	47,8333333	44,3333333	44,3333333
50	86,6666667	70,5	60,3333333
75	105,166667	82,5	70,5
100	116,666667	89	74,8333333
125	124	91,6666667	78,3333333
150	129,833333	94,1666667	79,3333333
175	132,666667	94,3333333	79,6666667
200	135,666667	95,5	80,8333333
225	136,5	96,1666667	81

Tabla 25. Promedios aritméticos

Se hallaron los valores del modelo como se observa en la tabla 26.

CONSTANTE DEL MODELO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
.?	54,4471182	40,6640091	37,7566128
A	138,81	96,49	81,15

Tabla 26. Parámetros del modelo

6.1.4. Alta frecuencia (1 KHz)

El procedimiento fue igual para el de continua, se alimentó la puerta del transistor con un voltaje de 12 V a 1 KHz. Los resultados se muestran en la tabla 27.

TIEMPO	SIN DISIPADOR		TPTC HORIZONTAL		TPTC VERTICAL	
00:00	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
	25	25	25	25	25	25
00:25	71	71	69	68	60	61
	71	72	69	68	60	61
	72	73	69	69	61	61
00:50	109	110	94	94	84	85
	108	109	94	93	84	85
	108	109	93	93	85	85
01:15	129	129	106	106	94	95
	129	129	106	104	94	95
	129	130	105	104	95	94
01:40	142	142	113	113	100	100
	141	143	114	113	99	99
	142	141	113	113	99	100
02:05	151	150	115	115	102	103
	150	151	115	115	102	102
	151	150	115	115	102	102
02:30	156	155	117	117	104	104
	155	155	117	117	104	104
	156	155	117	117	104	103
02:55	158	158	117	118	104	105
	159	159	117	118	104	105
	159	158	118	117	105	104
03:20	162	162	118	119	105	105
	162	161	119	119	104	105
	162	161	119	118	105	104
03:45	164	164	118	119	107	106
	163	163	119	119	105	106
	163	163	119	118	105	105

Tabla 27. Datos obtenidos a 1KHz

Se realizó la ANOVA como se observa en la tabla 28.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS LIBERTAD	MEDIA DE CUADRADOS	Fo
TIEMPO	188226	9	20914	30,0217716
DISIPADOR	46238,81111	2	23119,40556	33,1876022
INTERACCION	12539,3	18	696,6277778	2430,0969
ERROR	43	150	0,286666667	
TOTAL	247047,1111	179		

Tabla 28. ANOVA del experimento de tiempo y disipador

Los resultados de varianza se encuentran el la tabla 29.

ERROR	0,28666667
VARIANZA INTERACCIÓN	116,056852
VARIANZA TIEMPO	1123,18735
VARIANZA DISIPADOR	385,318648

Tabla 29. Varianza de los diferentes factores

Se determina el valor de β como en el caso anterior. Los resultados se encuentran en la tabla 30.

?		V1	V2	β
INTERACCIÓN	20,1457063	18	150	0,01
TIEMPO	62,6026788	9	150	0,01
DISIPADOR	36,6760797	2	150	0,01

Tabla 30. Error tipo II

Se puede observar que el tamaño de la muestra es suficiente para poder predecir algo estadísticamente aceptable porque el error es pequeño.

	Fo	V1	V2	a	F a,v1,v2
INTERACCIÓN	2430,0969	18	150	0,01	2.04
TIEMPO	30,0217716	9	18	0,01	3.60
DISIPADOR	33,1876022	2	18	0,01	6.01

Tabla 31. Determinación de efectos significantes

Como muestra la tabla 31 se puede observar que el tiempo tiene efecto significativo sobre la temperatura, así como el disipador y la interacción entre ellos dos.

Primero se restaron los 25 °C y se calculó la media de cada una de las muestras en su correspondiente tiempo y disipador. El tiempo se convirtió a segundos, los promedios de temperatura cada tiempo de muestran en la tabla 32.

TIEMPO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
0	0	0	0
25	46,6666667	43,6666667	43,6666667
50	83,8333333	68,5	59,6666667
75	104,166667	80,1666667	69,5
100	116,833333	88,1666667	74,5
125	125,5	90	77,1666667
150	130,333333	92	78,8333333
175	133,5	92,5	79,5
200	136,666667	93,6666667	79,6666667
225	138,333333	93,6666667	80,6666667

Tabla 32. Promedios aritméticos

Se hallaron los valores del modelo como se observa en la tabla33.

CCONSTANTE DEL MODELO	SIN DISIPADOR	TPTC HORIZONTAL	TPTC VERTICAL
.?	56,8442673	39,1032829	39,4926861
A	140,89	94,04	80,77

Tabla 33. Parámetros del modelo

6.2. COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN TPTC CON OTROS DISIPADORES DE CALOR

Al comparar el desempeño de un disipador de calor con otro, es necesario observar la **EFICIENCIA TÉRMICA** del dispositivo. La eficiencia térmica se define como la razón de cambio de temperatura con disipador respecto al cambio de temperatura sin disipador de la forma como lo muestra la ecuación (62).

$$E_T = \left(1 - \frac{\Delta T_D}{\Delta T_{SD}} \right) * 100 \quad (62)$$

Entre menor sea la eficiencia térmica, mayor va a ser el desempeño del disipador.

Se hicieron pruebas sobre el transistor sin disipador, con una aleta, con un ventilador y con TPTC en posición vertical, porque en esta posición como se

observó con anterioridad es la mas eficiente que en posición horizontal y se utilizaron para dos clases de potencias denominadas baja y alta como se comentaba en el capítulo anterior. Los resultados se presentan en la tabla 34.

POTENCIA	SIN DISIPADOR	ALETA	VENTILADOR	TPTC
BAJA	180,2	105,6	53,3	121,9
	180,5	105,2	53,2	121,6
	180,9	105,4	53,7	121,5
	180,9	106,9	53,6	121,6
	180,9	106,3	53,6	122,6
	180,9	106,1	53,5	122,6
	180,2	107	53,4	122,5
	180,9	106,9	53,6	122,7
	180,9	107,4	53,3	122,7
	180,2	106,7	53,5	122,2
ALTA	271,6	165,8	135,1	173,8
	269,4	165,8	134,7	173,8
	269,2	165,8	134,7	174,2
	271,5	165,4	133,2	174,2
	269,7	165,8	133,5	173,1
	269,2	165,8	132,3	173,1
	269,2	165,8	132,7	173,4
	269,7	165,8	132,7	173,8
	271,5	165,8	131,7	173,8
	269,2	166,2	133,5	173,4

Tabla 34. Datos Obtenidos¹

La ANOVA para este experimento de factores fijos se muestra en la tabla 35.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	Fo
DISIPADOR	181339,0065	3	60446,3355	142161,6305
POTENCIA	98126,0405	1	98126,0405	230779,2159
INTERACCIÓN	4633,6065	3	1544,5355	3632,539231
ERROR	30,614	72	0,425194444	
TOTAL	284129,2675	79		

Tabla 35. ANOVA del experimento

¹ Los datos son argumentados por medio de las termografías del ANEXO A

Se desea saber si el tamaño de la muestra es lo suficiente grande para poder determinar el error tipo II que se comete. Se determinó el tamaño de la muestra de efectos aleatorios para los factores de potencia, disipador y la interacción entre ambos como se hizo en el caso anterior. Los resultados de varianza se encuentran en la tabla 36.

ERROR	30,614
VARIANZA INTERACCIÓN	13808,9775
VARIANZA POTENCIA	24523,8566
VARIANZA DISIPADOR	271962,589

Tabla 36. Varianza sobre diferentes factores

Por medio de la ecuación (63) se determina el valor de f^2 que es un factor que me determina, dependiendo de sus grados de libertad, por medio de las “curvas características de operación para el análisis de varianza del modelo de efectos fijos”⁴ la probabilidad de aceptar la hipótesis o como en probabilidad se conoce como β . Los resultados se encuentran en la tabla 37.

$$j^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a t_i}{aS^2} \quad (63)$$

	f^2	f	V1	V2	β
INTERACCIÓN	112,766851	10,6191737	3	72	0,01
POTENCIA	200,26668	14,1515611	1	72	0,01
DISIPADOR	4441,80095	66,6468375	3	72	0,01

Tabla 37. Error tipo II

Se puede observar que el tamaño de la muestra es suficiente para poder predecir algo estadísticamente aceptable porque el error es pequeño.

Ya conociendo que el tamaño de la muestra es suficiente, se prosigue a mirar si tienen efectos significantes.

	Fo	V1	V2	a	F a,v1,v2
INTERACCIÓN	3632,539231	3	72	0,01	4.13
POTENCIA	230779,2159	1	72	0,01	7.08
DISIPADOR	142161,6305	3	72	0,01	4.13

Tabla 38. Determinación de los efectos significantes

Como muestra la tabla 38 se puede observar que la potencia tiene efecto significativo sobre la temperatura, así como el disipador y la interacción entre ellos dos.

Para este experimento se realizó el Test de Duncan para estas dos clases de potencias, para observar de forma apropiada si hay diferencia significativa entre un disipador y otro.

Para el caso de potencia baja se observa en la tabla 39 que hay diferencias significantes entre todos los disipadores, es decir, las eficiencias entre unos y otros, con respecto a la temperatura, son comparables siendo mejor el ventilador, luego la aleta y por último el TPTC en posición vertical. Se puede observar también que hay una diferencia muy fuerte entre los 3 disipadores y el transistor sin disipador.

VENTILADOR VS SIN DISIPADOR	127,18 > 0,83099582
VENTILADOR VS TPTC	68,72 > 0,80831355
VENTILADOR VS ALETA	52,88 > 0,77532116
ALETA VS SIN DISIPADOR	74,3 > 0,80831355
ALETA VS TPTC	15,84 > 0,77532116
TPTC VS SIN DISIPADOR	58,46 > 0,77532116

Tabla 39. Test de DUNCAN potencia baja

Las eficiencias térmicas sobre cada uno de los disipadores con respecto al transistor trabajando en potencia baja sin disipador se muestran en la tabla 40.

VENTILADOR	81,7089624 %
ALETA	47,7353036 %
TPTC	37,5586251 %

Tabla 40. Eficiencia de los disipadores

A pesar que hay una gran eficiencia en el TPTC, no se compara con el del ventilador y es cercano al de la aleta.

Para el caso de potencia alta se observa en la tabla 41 que hay diferencias significantes entre todos los disipadores, es decir, las eficiencias entre unos y otros, con respecto a la temperatura, son comparables siendo mejor el ventilador, luego la aleta y por último el TPTC en posición vertical. Se puede observar que hay una diferencia muy grande entre los 3 disipadores y el transistor sin disipador.

VENTILADOR VS SIN DISIPADOR	136,56 > 0,83099582
VENTILADOR VS TPTC	40,25 > 0,80831355
VENTILADOR VS ALETA	32,39 > 0,77532116
ALETA VS SIN DISIPADOR	104,17 > 0,80831355
ALETA VS TPTC	7,86 > 0,77532116
TPTC VS SIN DISIPADOR	96,31 > 0,77532116

Tabla 41. Test de DUNCAN potencia alta.

Las eficiencias térmicas sobre cada uno de los disipadores con respecto al transistor sin disipador se muestran en la tabla 42.

VENTILADOR	55,7456015	%
ALETA	42,5235743	%
TPTC	39,3150182	%

Tabla 42. Eficiencia de los disipadores

A pesar que hay una gran eficiencia en el TPTC, no se compara con el del ventilador y es cercano al de la aleta.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. COMPARACIÓN DEL PERFIL TÉRMICO ANTES Y DESPUÉS DE UTILIZAR EL TPTC

Se utilizará para la elaboración del modelo térmico del transistor y del TPTC en posición vertical y horizontal el modelo de la forma vista en la expresión (58).

$$\Delta T = A (1 - e^{-t/\tau}) \quad (58)$$

Donde t es el tiempo de operación, τ es el tiempo de saturación y A es la temperatura máxima, estos valores y la forma como se hallaron se explica en el capítulo anterior

7.1.1. Continua (0 Hz)

Las gráficas de operación de continua son mostradas en la ilustración 23

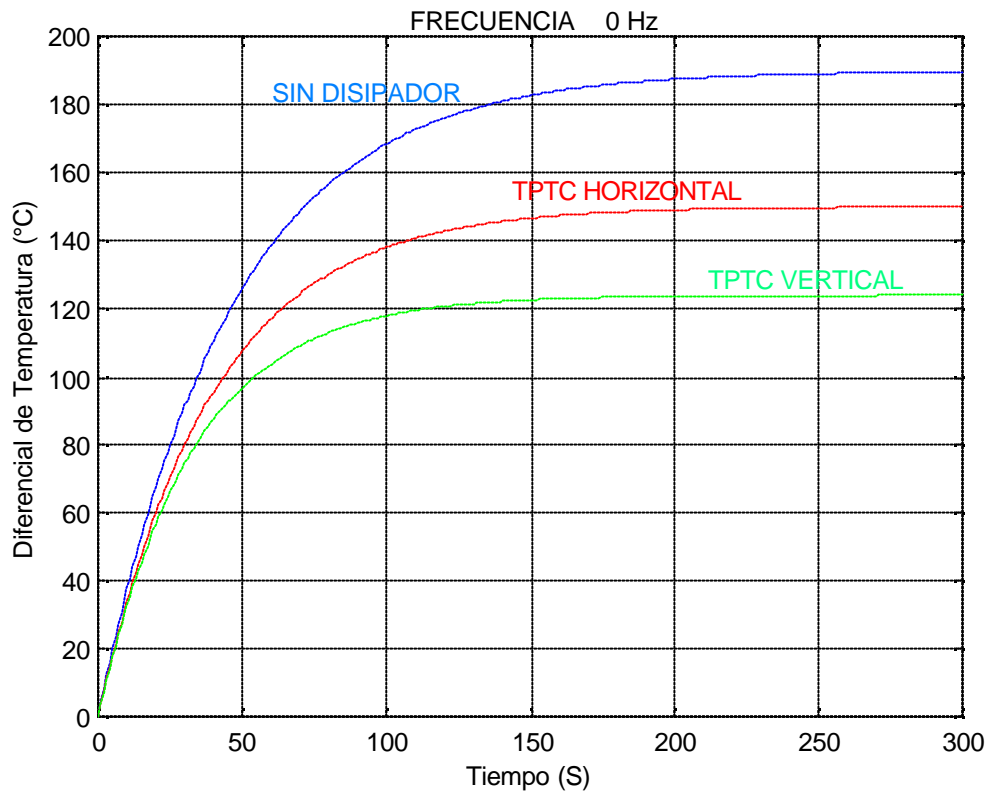


Ilustración 26. Gráfica Temperatura Vs Tiempo

Una expresión para el transistor sin disipador se presenta en la ecuación (64).

$$\Delta T = 189.84 (1 - e^{-t / 45.71}) \quad (64)$$

Lo mismo se realiza con el TPTC en posición horizontal y vertical las cuales se observan en las ecuaciones (65) y (66) respectivamente.

$$\Delta T = 150.08 (1 - e^{-t / 39.45}) \quad (65)$$

$$\Delta T = 124.08 (1 - e^{-t / 32.9}) \quad (66)$$

Se puede observar que para una operación en continua la temperatura del transistor sin disipador es muy alta y puede ocasionar en un futuro problemas

en un ambiente cerrado generando calor en los demás elementos del sistema. Cuando se aplica el TPTC horizontal la temperatura baja, protegiendo el transistor de cambios de temperatura bruscos. Pero es aun superior el desempeño del disipador de calor en posición vertical. Es posible apreciar que el TPTC trabaja de forma superior en posición vertical como se observaba en la teoría, porque el flujo de vapor puede subir libremente como se veía en el capítulo 1.

7.1.2. Baja frecuencia (10 Hz)

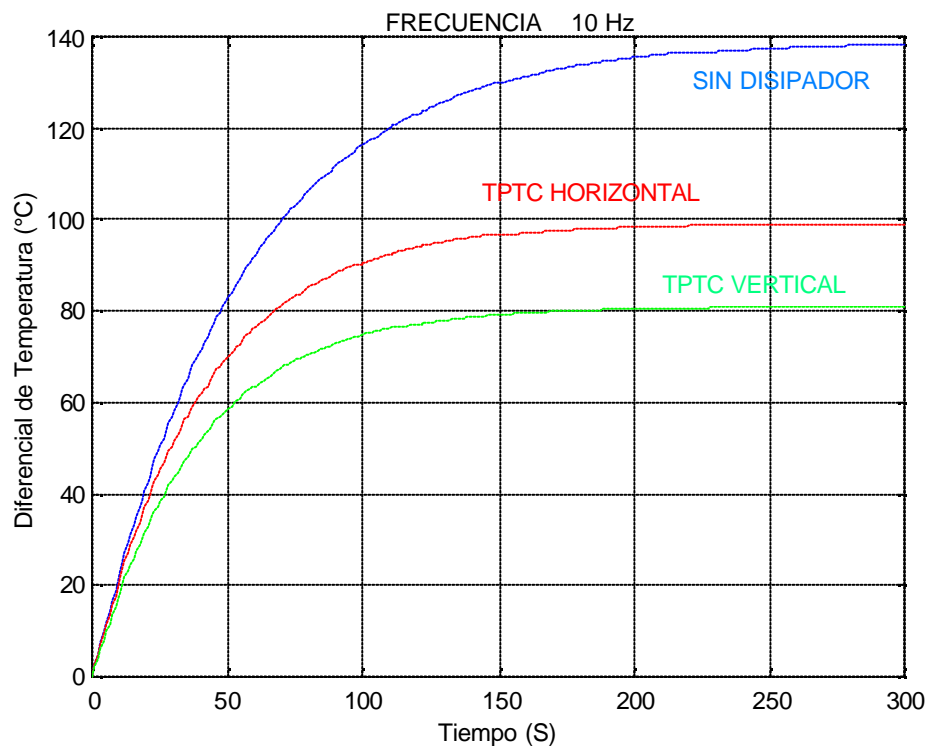


Ilustración 27. Gráfica Temperatura Vs Tiempo

Una expresión para el transistor sin disipador se presenta en la ecuación (67).

$$\Delta T = 139.04 (1 - e^{-t / 55.04}) \quad (67)$$

Lo mismo se realiza con el TPTC en posición horizontal y vertical lo cual se observa en las ecuaciones (68) y (69) respectivamente.

$$\Delta T = 99.19 (1 - e^{-t / 40.72}) \quad (68)$$

$$\Delta T = 80.9 (1 - e^{-t / 38.64}) \quad (69)$$

Se puede observar que para una operación a 10 Hz la temperatura del transistor sin disipador es muy alta, pero baja comparada con la de continua donde la temperatura es extremadamente alta. Aun así se puede ocasionar en un futuro problemas. Cuando se aplica el TPTC horizontal la temperatura baja considerablemente y su constante de tiempo se prolonga, protegiendo el transistor de cambios de temperatura bruscos al arranque como en los casos anteriores. Pero también es superior el desempeño del disipador de calor en posición vertical.

7.1.3. Media frecuencia (100 Hz)

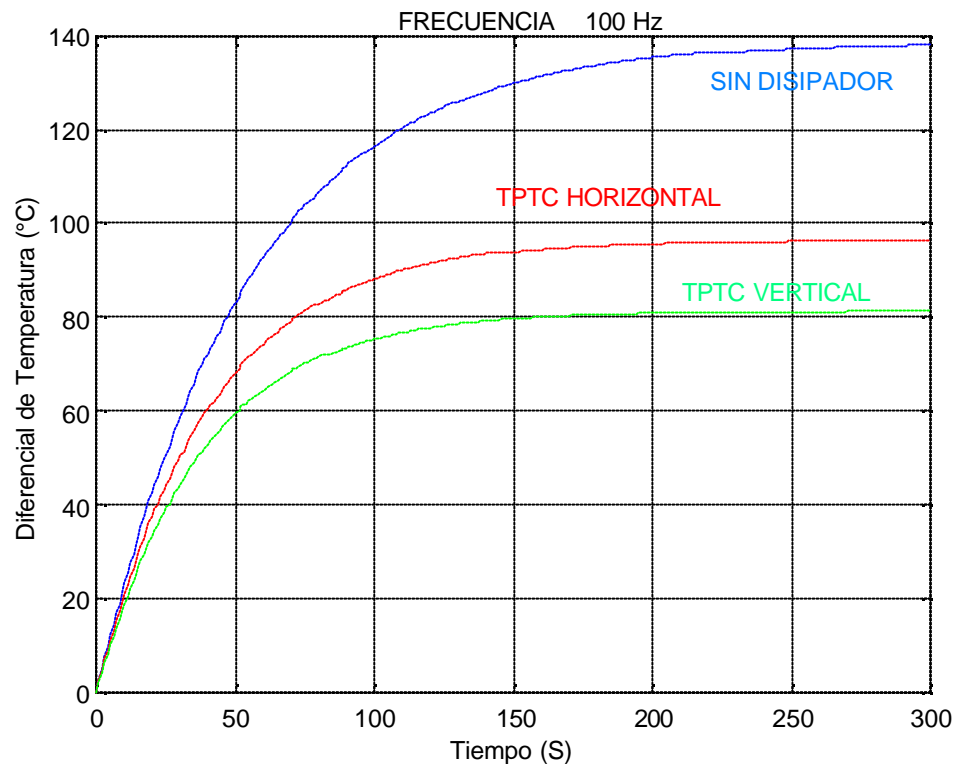


Ilustración 28. Gráfica Temperatura Vs Tiempo

Una expresión para el transistor sin disipador se presenta en la ecuación (70).

$$\Delta T = 138.81 (1 - e^{-t / 54.44}) \quad (70)$$

Lo mismo se realiza con el TPTC en posición horizontal y vertical lo cual se observa en las ecuaciones (71) y (72) respectivamente.

$$\Delta T = 96.49 (1 - e^{-t / 40.66}) \quad (71)$$

$$\Delta T = 81.15 (1 - e^{-t / 37.75}) \quad (72)$$

Se puede observar que para una operación a 100 Hz la temperatura del transistor sin disipador es muy alta, pero baja comparada con la de continua donde la temperatura es extremadamente alta, pero es parecida al del caso de 10 Hz. Cuando se aplica el TPTC horizontal la temperatura baja considerablemente, protegiendo el transistor de cambios de temperatura bruscos al arranque. Pero también es superior el desempeño del disipador de calor en posición vertical.

7.1.4. Alta frecuencia (1 KHz)

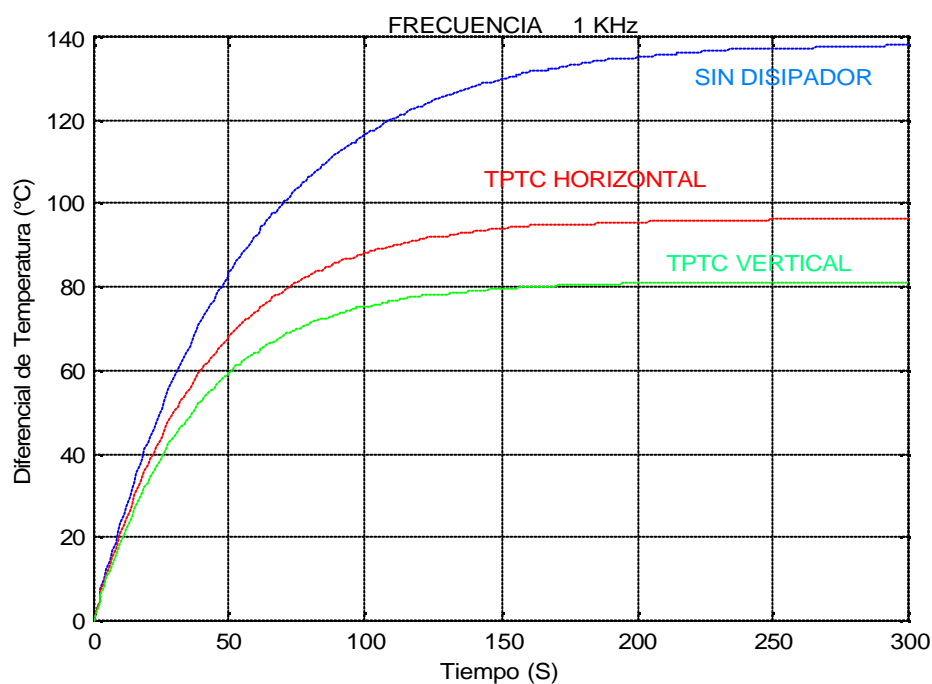


Ilustración 29. Gráfica Temperatura Vs Tiempo

Una expresión para el transistor sin disipador se presenta en la ecuación (73).

$$\Delta T = 140 \cdot 89 \left(1 - e^{-t / 56 \cdot 84} \right) \quad (73)$$

Lo mismo se realiza con el TPTC en posición horizontal y vertical lo cual se observa en las ecuaciones (74) y (75) respectivamente.

$$\Delta T = 94.04 (1 - e^{-t / 39.10}) \quad (74)$$

$$\Delta T = 80.77 (1 - e^{-t / 39.49}) \quad (75)$$

Se puede observar que para una operación a 1KHz la temperatura del transistor sin disipador es muy alta, pero baja comparada con la de continua donde la temperatura es extremadamente alta, pero es parecida al del caso de 10 Hz y 100Hz. Cuando se aplica el TPTC horizontal la temperatura baja considerablemente y su constante de tiempo se prolonga, protegiendo el transistor de cambios de temperatura bruscos al arranque. Pero también es superior el desempeño del disipador de calor en posición vertical.

7.1.5. Comparación por disipadores

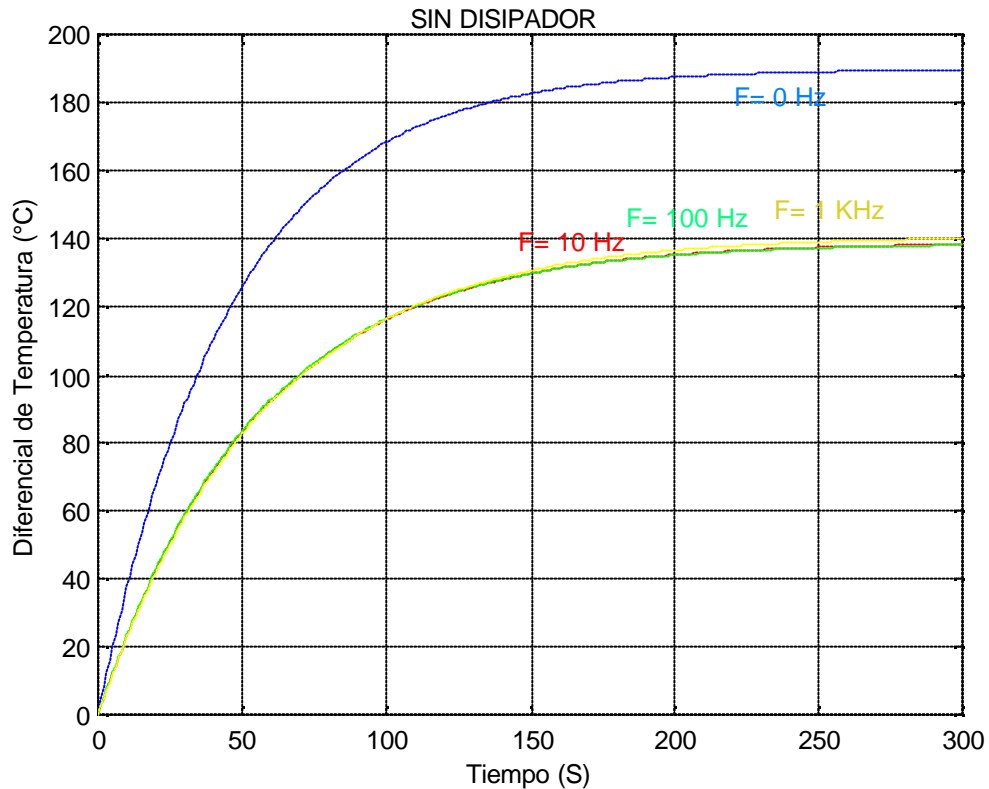


Ilustración 30. Gráfica Temperatura vs. Tiempo del Transistor

Ahora se comparará lo ocurrido al transistor sin disipador a diferentes frecuencias. Se observa en la ilustración 30 que el transistor cuando se trata de voltaje en continua la temperatura es mas grande y a frecuencias entre 10Hz y 1KHz la temperatura es la misma. La respuesta a este fenómeno no es tan obvia porque a simple vista se observa que la temperatura no depende de la frecuencia de operación (Dentro del ancho de banda del transistor), sino de la potencia promedio, ya que es la misma en los tres casos. Se observa que a potencias altas el transistor llega a un punto de que la temperatura es casi incontrolable.

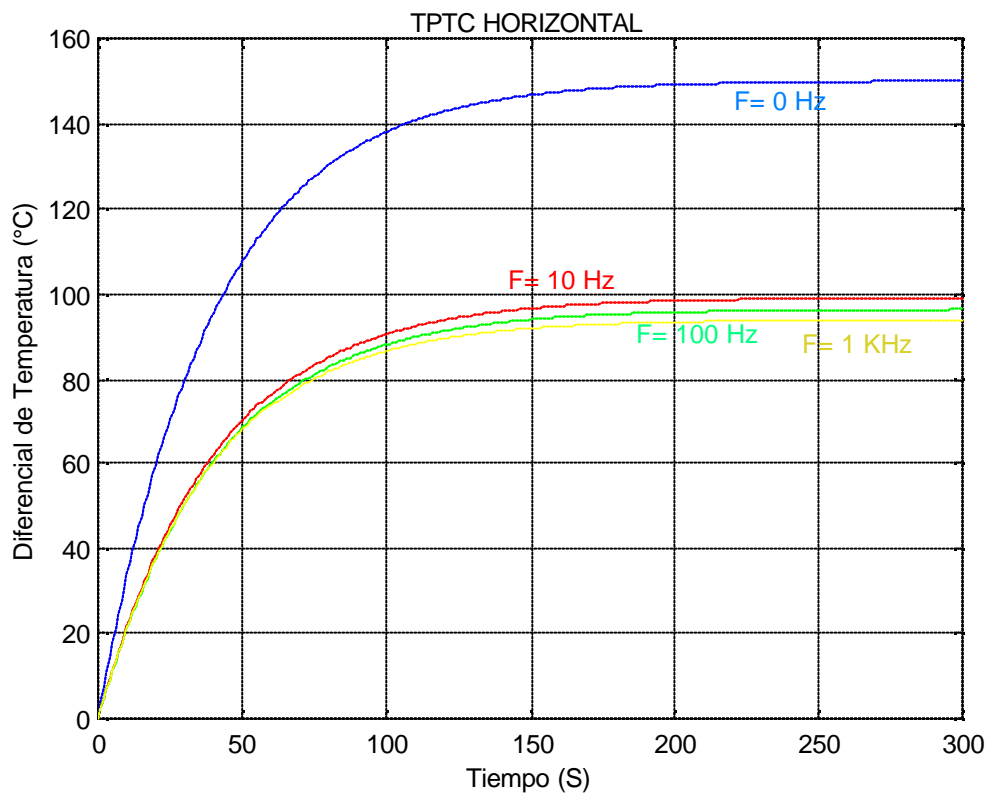


Ilustración 31. Gráfica de temperatura vs tiempo con un TPTC horizontal

En la ilustración 31 se observa que el TPTC en posición horizontal tiene una eficiencia similar a cualquier frecuencia, lo importante en este caso es la potencia que el transistor consumirá. Se puede utilizar cuando la potencia no sea muy alta.

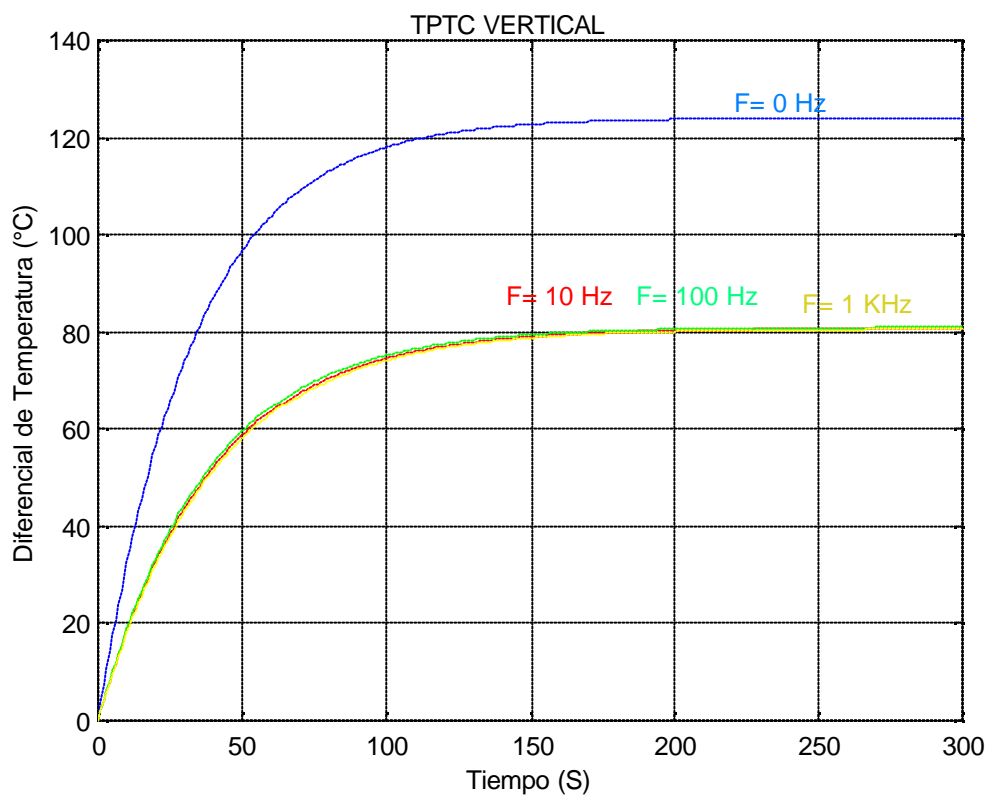


Ilustración 32. Gráfica Temperatura vs. Tiempo con un TPTC vertical

En la ilustración 32 se observa que el TPTC en posición vertical tiene una eficiencia similar a cualquier frecuencia, lo importante en este caso es la potencia que el transistor consumirá. Se puede utilizar cuando la potencia sea muy alta ya que tiene una eficiencia superior a la del TPTC horizontal.

7.2. COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN TPTC CON OTROS DISIPADORES DE CALOR

La eficiencia térmica se define, como se había dicho con anterioridad, la razón de cambio de de temperatura con disipador respecto al la temperatura sin disipador de la forma como lo muestra la ecuación (60).

$$E_T = \left(1 - \frac{\Delta T_D}{\Delta T_{SD}} \right) * 100 \quad (60)$$

La eficiencia de los 3 disipadores con respecto al transistor sin disipador para potencias bajas y altas, como se había observado en el capítulo anterior, en la tablas 40 y 42 respectivamente es la siguiente:

Para potencia alta se tiene:

VENTILADOR	55,7456015	%
ALETA	42,5235743	%
TPTC	39,3150182	%

Y para potencia baja:

VENTILADOR	81,7089624	%
ALETA	47,7353036	%
TPTC	37,5586251	%

Se puede observar que la eficiencia del ventilador es superior, pero lo es aún más para potencias bajas. Esta diferencia significativa para disipar el calor se debe en gran parte a que la forma en que disipa el calor es por medio de convección forzada que trata de llevar al objeto a la temperatura ambiente. Su gran desventaja es la necesidad de estar en un ambiente donde la temperatura sea baja y además necesita de electricidad para que el dispositivo funcione, lo cual acarrea un consumo adicional de potencia.

El segundo en efectividad es la aleta. Es tal vez el dispositivo más sencillo y barato de que se encuentra en el mercado, tiene una eficiencia de un poco más arriba del 50 %, su gran problema es que solo puede disipar el calor de un dispositivo y no en masa.

Por último en efectividad está el TPTC (esto no indica que el disipador sea malo), aun así posee una efectividad constante comparada al resto y parecida al de la aleta. Tiene además tiene la posibilidad de colocar varios dispositivos de pequeña potencia en serie y así disipar el calor en cantidad. Sus problemas tal vez son el precio que es el más elevado de los tres.

La tabla 43 muestra una explicación más sencilla de lo comentado con anterioridad.

Aun así, si se mezclan varios disipadores, como por ejemplo un TPTC y un ventilador la eficiencia supera a cualquier otro dispositivo de disipación de calor, lo importante en general es que el TPTC pueda retirar esa cantidad de

calor. El TPTC lo venden dependiendo de la cantidad de calor que puede disipar y su posición es una cuestión de diseño muy importante. Dependiendo del calor que puede retirar no va a importar en gran parte lo largo que es, sino el ancho del radio del TPTC. Por ejemplo el TPTC utilizado puede retirar (según el fabricante) hasta 40W en posición vertical y 15W en posición horizontal y un radio de TPTC de 3mm. Si fuera más grande el radio, podría disipar más calor.

DISIPADOR	VENTAJA	DESVENTAJA
ALETA	<ul style="list-style-type: none"> • Es mas barato. • Tiene una efectividad casi del 50%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo puede actuar sobre un dispositivo a la vez. • El calor se disipa por conducción provocando que otros elementos cercanos se calienten.
VENTILADOR	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene una eficiencia muy alta. • Es más barato que un TPTC. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se puede aplicar a dispositivos que se encuentren encerrados y o se encuentren en un ambiente cálido. • Necesita de electricidad.
TPTC	<ul style="list-style-type: none"> • Fácilmente maleable. • Se pueden instalar con varios dispositivos pequeños en serie o en integrados. • El funcionamiento es totalmente mecánico. 	<ul style="list-style-type: none"> • El precio de un TPTC es de 20 dólares. • Tiene una efectividad pequeña comparada al resto.

Tabla 43. Ventajas y desventajas de cada disipador

8. PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA PREDECIR EL FUNCIONAMIENTO DE UN TPTC

Este programa fue creado pensando que en algún momento se empiece a desarrollar este tipo de disipadores en la industria Colombiana. Trabaja con el programa MATLAB en la ventana principal digitando la palabra "TPTC". Este diseño se basó en del libro Heat Pipes ⁵ entre las páginas 133 a la 151 y enseña la forma en que se debe escoger el tipo de fluido, la malla y el contenedor. Además muestra consideraciones de diseño como son los límites térmicos más significantes que afectan al TPTC.

En el programa se asumió que el flujo de vapor no sería turbulento sino laminar, es decir, la diferencia de presión de vapor dentro del tubo iba a ser cero, por eso se aconseja que al diseñar el TPTC el usuario realice modelos sobredimensionados porque el calor que se muestra es el máximo ideal, es decir, es una buena aproximación.

8.1. VARIABLES DE ENTRADA

- Fluido (Selección).

- Malla (Selección).
- Calor del proceso.
- Temperatura máxima.
- Temperatura mínima.
- Radio del TPTC.
- Radio de la sección de vapor.
- Longitud del tubo.
- Grados de inclinación.

8.2. VARIABLES DE SALIDA

- Temperatura de operación del fluido.
- Compatibilidad con contenedores.
- Observación del límite de atrapamiento.
- Observación del límite capilar.
- Observación de límite de sonido.
- Gráfica CALOR DISIPADO Vs TEMPERATURA.

8.3. VENTANA DE INTRODUCCIÓN

Esta ventana del programa da una breve introducción teórica a los TPTC y consideraciones de diseño para que el usuario no empiece de cero y pueda empezar a diseñar su TPTC con todas las consideraciones y suposiciones que

se dicen allí. Aun así si el usuario desea omitir esa parte puede saltarla y continuar con su diseño.

8.4. VENTANA DE SELECCIÓN DE FLUIDO Y CONTENEDOR

Escoger el fluido es tal vez el trabajo más arduo que tiene que hacer el diseñador, porque en el tiene involucradas una cantidad de variables como son el calor latente, la densidad del fluido en estado de vapor y líquido, la viscosidad, la presión del vapor la conductividad térmica y la tensión superficial del líquido y su variación con la temperatura.

Se almacenó en una matriz toda la información de las propiedades del fluido descritas en el párrafo anterior para cada temperatura, por lo que el usuario no debe preocuparse por esa información y solo oprimir el botón correspondiente al fluido con el que desea trabajar.

En la parte inferior aparece una información la cual contiene el rango de temperaturas en que el fluido puede trabajar y la descripción de los elementos que se usan para elaborar su contenedor porque es importante que tanto el fluido como el contenedor sean compatibles para que no ocurra un proceso de corrosión o desgaste de los elementos. De esta forma el usuario solo conociendo el fluido, puede seleccionar el material del contenedor a su gusto.

También aparece en esa ventana la selección de la malla. En esta selección, la cual el usuario podría hacer al azar si no se tiene un fundamento teórico, aparecen todos los tipos de mallas que son utilizadas comúnmente, basado del libro Heat Pipes⁵ en las páginas 106-108. Las mallas se encuentran en un menú desplegable y la selección es mostrada con su respectivo nombre en inglés. Luego de seleccionar la malla debe oprimir el botón “ACEPTAR MALLA”.

En la selección del tipo de malla lo que realmente se está seleccionando es el radio de poro y su permeabilidad, factores importantes en el funcionamiento del TPTC porque de ellos depende la presión capilar dentro del tubo.

ESCOJA EL FLUIDO PARA SU TPTC

AMONIACO PENTANO ACETONA

ETANOL METANOL

HEPTANO AGUA

Para este TPTC puede utilizar Cobre, Monel o Acero inoxidable 347 para el contenedor

ESCOJA LA MALLA PARA SU TPTC

Cooper 60

ACEPTAR MALLA

SEGUIR

Ilustración 33. Ventana de selección de fluido y malla

Tan pronto el usuario haya escogido los elementos que componen el disipador de calor el usuario oprime el botón de “SEGUIR” para el siguiente nivel, parámetros del modelo. La ilustración 33 muestra la ventana de ejecución.

8.5. VENTANA DE PARÁMETROS DEL MODELO

El modelo continúa con la selección de algunos parámetros importantes en el diseño. El usuario escoge los valores del calor del sistema el cual desea disipar, la temperatura máxima y mínima de operación, el radio del TPTC, el radio de la sección de vapor, la longitud del tubo y por último los grados de inclinación respecto la horizontal. Estos valores deben ser introducidos en las unidades solicitadas por el programa. Después que el usuario coloque estos valores debe oprimir el botón “CALCULAR”, este botón calculará la cantidad de calor máxima, los límites y la gráfica de CALOR Vs TEMPERATURA por medio de un método de interpolación. En la parte inferior aparece un cuadro de observaciones que con solo oprimir los botones “LÍMITE DE SONIDO”, “LÍMITE CAPILAR” y “LÍMITE DE ATRAPAMIENTO” le muestra las observaciones respecto a estos 3 factores, el usuario dependiendo de las necesidades, debe considerar estas observaciones. El botón “LIMPIAR” limpia la gráfica que se ha hecho recientemente. Se realizó con la finalidad que el usuario tenga posibilidad de mirar como varía, dependiendo de las dimensiones del tubo, la eficiencia del TPTC. El botón “VOLVER” regresa a la ventana de determinación del fluido y la malla y por último el botón “SALIR” sale del programa por

completo. La ilustración 34 muestra como es el aspecto de la ventana de ejecución.

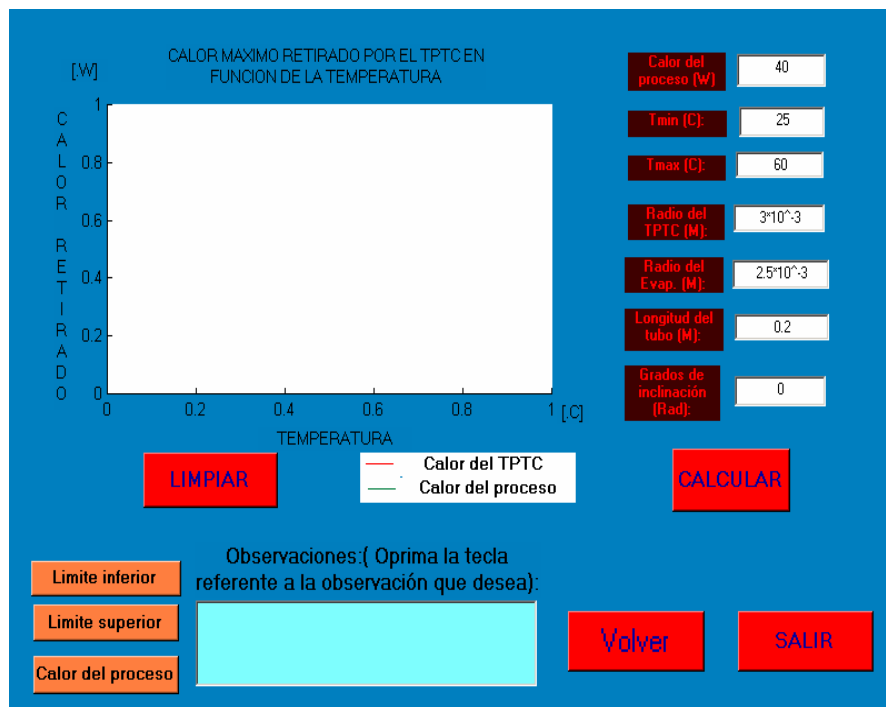


Ilustración 34. Ventana de cálculo de calor disipado en función de la temperatura

8.6. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA

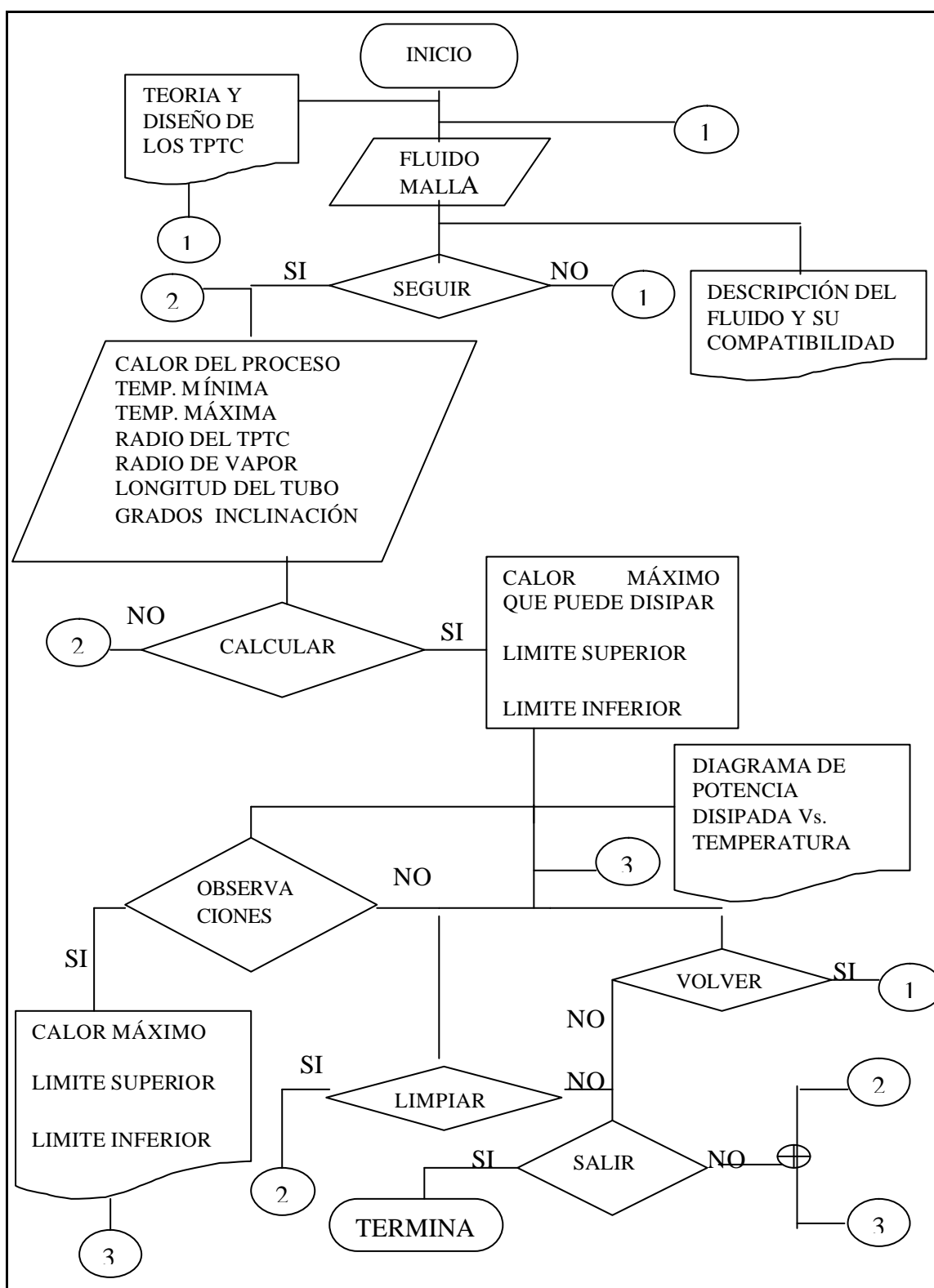


Ilustración 35. Diagrama de flujo del programa

9. CONCLUSIONES

1. Al aplicar el TPTC a un dispositivo electrónico de alta potencia, se observa que éste es una alternativa eficiente en el enfriamiento de dispositivos electrónicos. Al hacer el análisis por medio de su perfil térmico a través del tiempo, se deduce que la disipación de calor es eficiente, bajando temperaturas de operación 190 °C a 124 °C en posición vertical y de 190 °C a 150 °C en posición horizontal, obteniendo una eficiencia del 21 al 35 % dependiendo de su posición. Así mismo, bajando temperaturas de operación de 139 °C a 81 °C en posición vertical y de 139 °C a 81 °C en posición horizontal, se obtiene una eficiencia entre el 29 y el 42% dependiendo de su posición.
2. Las gráficas y las ecuaciones planteadas son cercanas a la realidad del funcionamiento del dsipador en este sistema, observándose en ellas que el TPTC es un disipador eficiente en el arranque como en estado estable, disminuyendo altas temperaturas que pueden afectar el buen funcionamiento del circuito.
3. La posición del TPTC es un factor determinante en la disipación del calor. En la posición vertical, el TPTC obtiene un desempeño mayor que en posición horizontal. Si se coloca el TPTC aunque sea a unos pocos

grados por debajo de la posición horizontal, el TPTC es completamente ineficiente.

4. Al comparar la eficiencia en la disipación del calor entre los diversos dispositivos estudiados, se deduce que el de mejor desempeño sigue siendo el ventilador, seguido por la aleta y por último por el TPTC, tanto en potencias bajas como altas. Aun así, el TPTC es un elemento que no se puede descartar porque tiene una buena eficiencia, no consume potencia y su uso es conveniente en dispositivos de baja potencia colocados en serie.
5. Basados en las comparaciones realizadas y en los principios de la termodinámica y la transferencia de calor, se puede afirmar que la convección forzada es la mejor forma para la disipación de calor en circuitos electrónicos. Sin embargo, la convección forzada por medio de un ventilador acarrea más consumo de energía en el sistema y al pasar el tiempo puede presentarse daños de este por el uso a diferencia del TPTC cuya vida útil es muy larga.
6. Un transistor de potencia puede alcanzar temperaturas tan altas en su operación, que la vida útil de los equipos que utilizan este tipo de dispositivos electrónicos depende en gran parte en la forma como el calor sea controlado sin llegar a sacrificar su buen funcionamiento. Por eso, la mejor manera de controlar la temperatura en ellos sin llegar a

afectar su punto de operación, es por medio de un disipador de calor eficiente.

7. El programa que se desarrolló para modelar y simular el comportamiento de un TPTC es una buena alternativa para su diseño, ya que le señala al usuario el calor máximo que puede disipar el TPTC y lo compara con el calor que necesita retirar el diseñador, procedimiento que puede intentar reiterativamente hasta encontrar el modelo que más se adecúe a sus necesidades.
8. En el diseño de un TPTC es necesario conocer factores como las propiedades de un fluido, las dimensiones del tubo y el material de la malla, porque inciden directamente en la cantidad de calor que ellos pueden disipar.

10.RECOMENDACIONES

1. Para el próximo estudio de TPTC se recomienda la utilización de diferentes tipos de TPTC, como por ejemplo los usados en los procesadores de los computadores, ya que utilizan un sistema diferente al empleado en este trabajo de grado. Ese sistema se llama de conductancia variable y son muy eficientes y fáciles de controlar.
2. Se debe continuar el estudio de otros disipadores de calor en circuitos electrónicos novedosos como las células Peltier debido a que en un futuro no muy lejano, serán dispositivos encontrados en muchas aplicaciones militares, industriales, del hogar, entre otros.
3. Se necesita una mayor motivación por parte de los profesionales a este tipo de estudios, ya que son factores que invisiblemente pueden afectar sus diseños y no son considerados por ser un tema que no se encuentra a la mano y no es fácil de entender. A título personal, reitero colocar materias como termodinámica y transferencia de calor en el pensum de pregrado.
4. Si se desea construir un TPTC es necesario que se remita a la bibliografía de este documento. Muchos de ellos relatan la elaboración

paso a paso de estos dispositivos comentando los errores que se pueden cometer y la forma de evitarlos, además en el ANEXO B se presenta un procedimiento industrial para la elaboración que puede servir de utilidad en el futuro.

5. Es importante que se realice gráficas del transitorio de temperatura a través de tiempo de los 3 disipadores de calor estudiados para poder considerar en que momentos es más efectivo utilizar uno o el otro en un lapso de tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

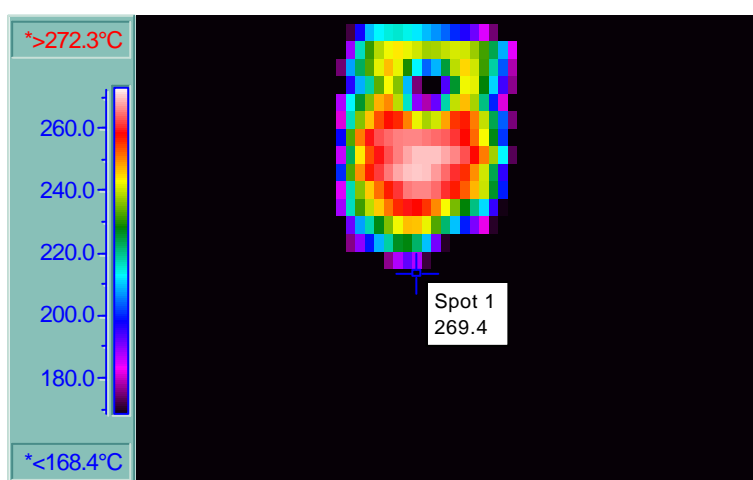
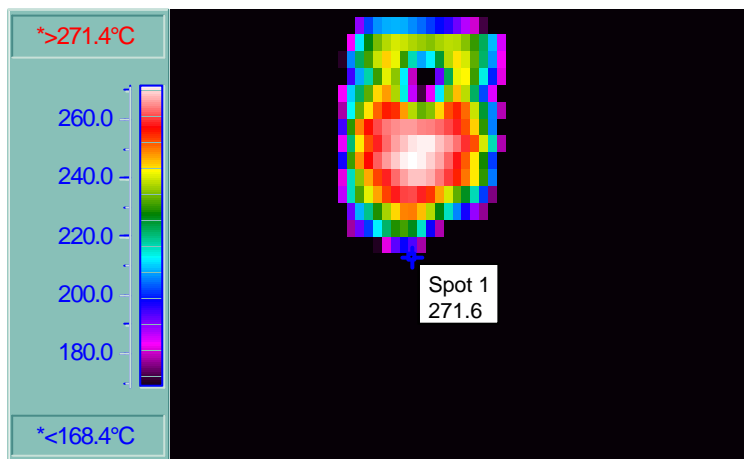
1. Castellan Gilbert W., Fisicoquímica, segunda edición, Ed. Pearson education, 1998.
2. Van Wylen Gordon J. –Sonntag Richard E., Fundamentos de Termodinámica, 3ª Edición, ed. Limusa – wiley S.A., 1972.
3. Universidad Católica de Chile, Propiedades del agua, Disponible en URL: http://www.puc.cl/quimica/agua/tension_sup.htm
4. SATHAYE NINAD D., INCORPORATION OF HEAT PIPES INTO ENGINE AIR PRE-COOLING: A FEASIBILITY STUDY. Disponible en URL : http://www.ngml.ksu.edu/research/project_archive/project_archive_publications/engine/sathaye.pdf
5. Dunn P.D. – Reay D.A., HEAT PIPES. 2a edición, Gran Bretaña, ed. Pergamon Press, 1978.
6. Gernert Nelson J., Wert Kevin L., Cruse Ellen M., Multi-Kilowatt Heat Pipe Heat Sink Performance,. Disponible en URL : www.thermacore.com/pdfs/kilowatt.pdf
7. Gernert Nelson J., Heat Pipe Reliability Documentation. Disponible en URL : http://www.thermacore.com/pdfs/heatpipe_reliability.pdf
8. Mucciardi F., Richards G. G., Jin N., Durable Temperature Sensor for Extreme Environments. Disponible en URL: <http://www.mmpc.mcgill.ca/~frank/sensor99.pdf>

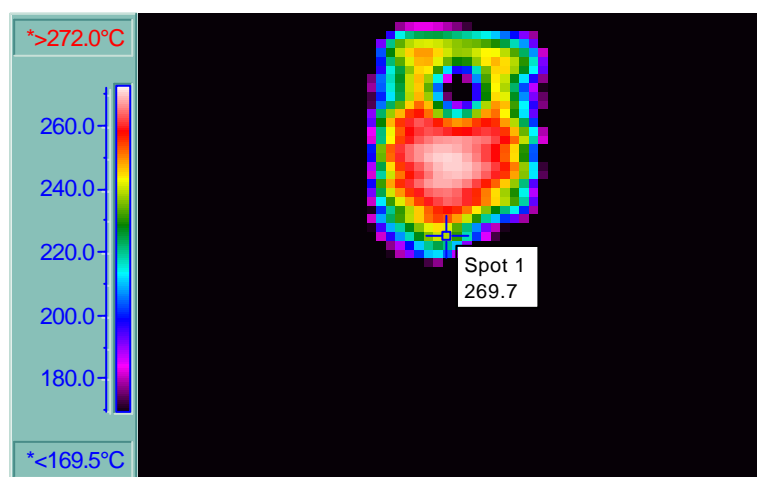
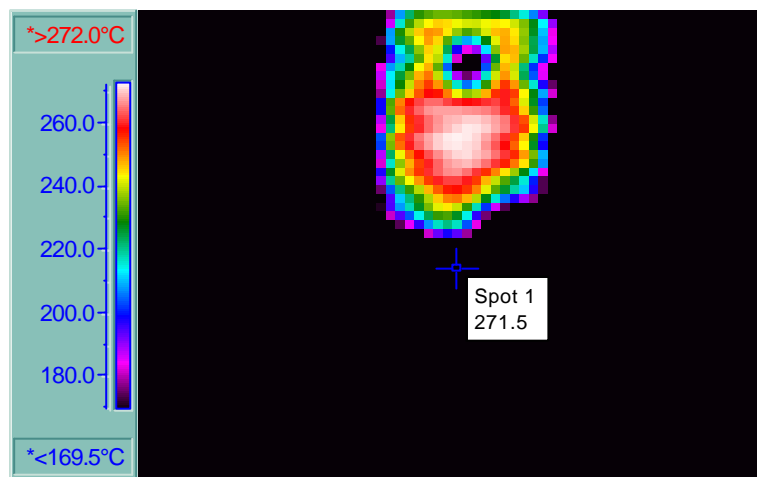
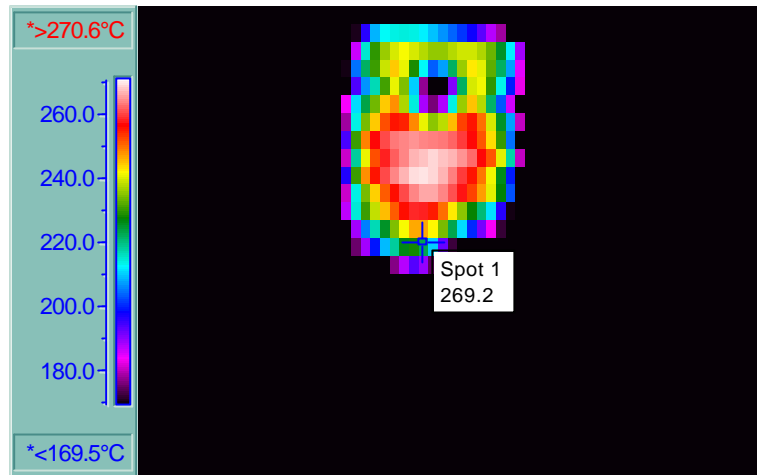
9. Reid Robert S., Merrigan Michael A. Heat Pipe Activity in the Americas - 1990 to 1995. Disponible en URL: http://www.lanl.gov/orgs/esa/epe/Heat_Pipe_Site/Main_Paper_5.pdf
10. Scott P.E., Garner D., Heat pipes for electronic cooling applications. Disponible en URL: http://www.coolingzone.com/Content/Library/Papers/Sep%201996/Article%2002/Sep%201996_02.html
11. Goddard Space Flight Center (NASA), "Ammonia-charged aluminium heat pipes with extructured wicks". Disponible en URL: http://klabs.org/DEI/References/design_guidelines/design_series/1209.pdf
12. Xie H., Aghazadeh M., Toth J. The use of heat pipes in the cooling portables uit high power packages. Disponible en URL: <http://www.thermacore.com/pdfs/hpcp2.pdf>
13. Chakrabarty Krishnendu, Pamula Vamsee K. Cooling of Integrated Circuits Using Droplet-Based Microfluidics. Disponible en: <http://www.ee.duke.edu/Research/microfluidics/documents/GLSVLSI-P1-6-Pamula.pdf>
14. Moreno Wilfredo, Aplicaciones al Diseño y Análisis de Experimentos, primera edición, Ediciones UIS, 1993.
15. Montgomery Douglas, Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería.
16. Universidad Industrial de Santander, Diseños de Experimentos, Disponible en URL: <http://carpintero.uis.edu.co:8443/doe/index.html>

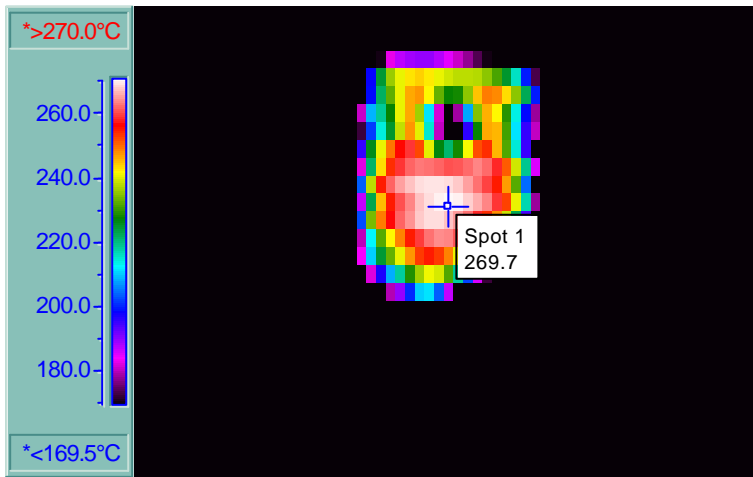
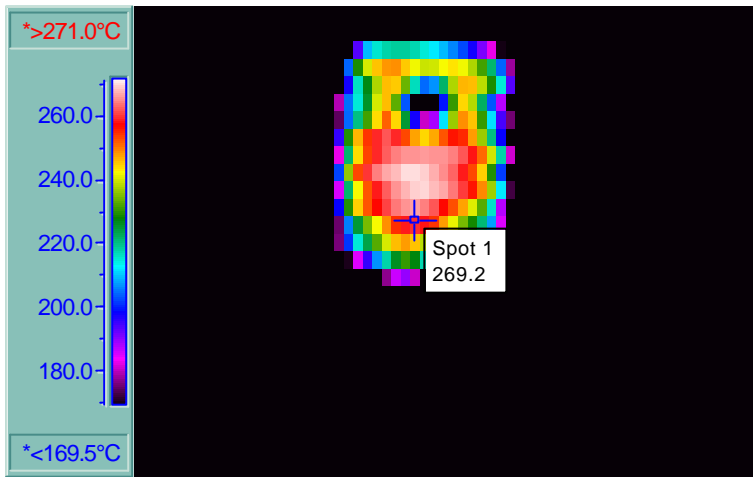
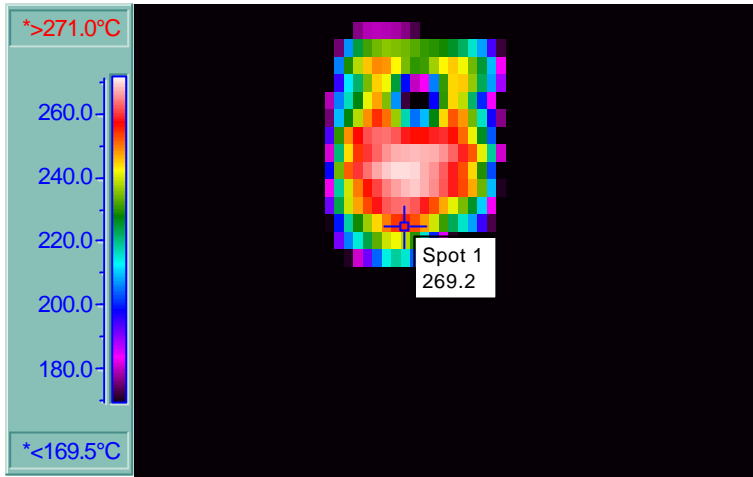
ANEXO A. Termografías tomadas para medir la eficiencia de los disipadores

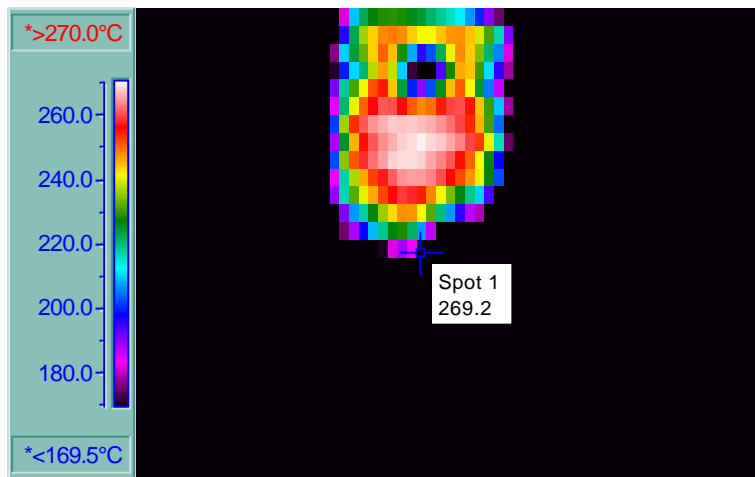
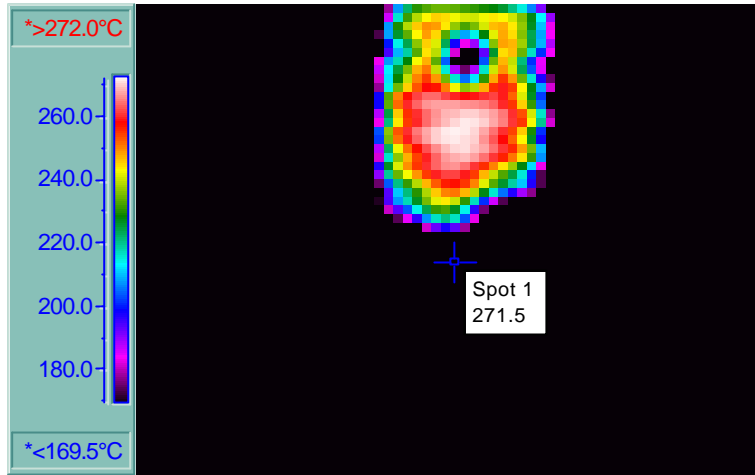
ALTA POTENCIA

SIN DISIPADOR

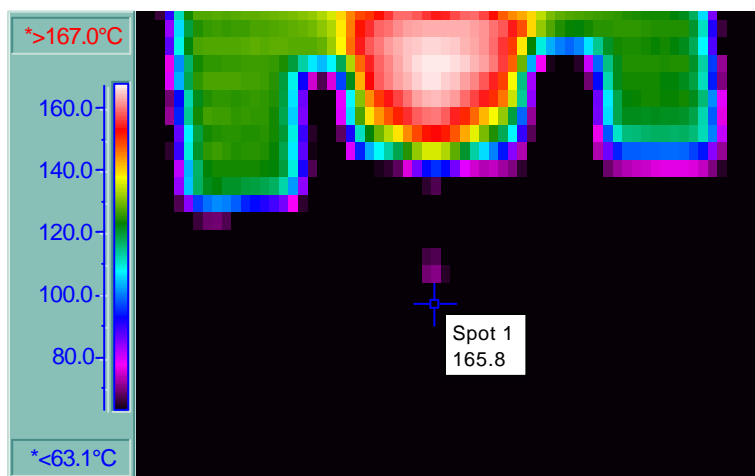


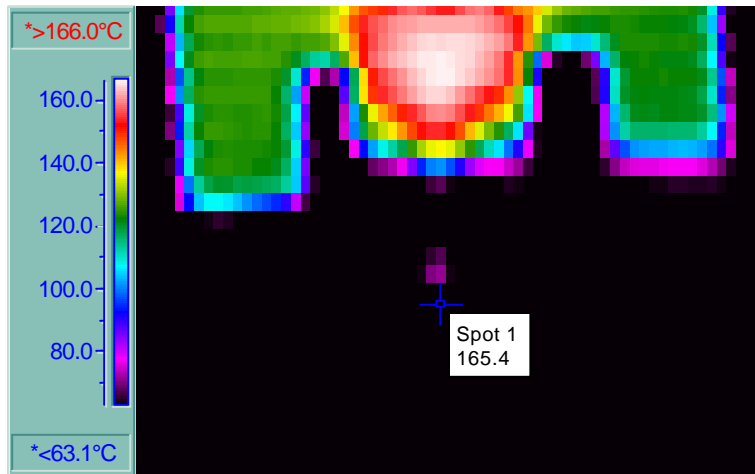
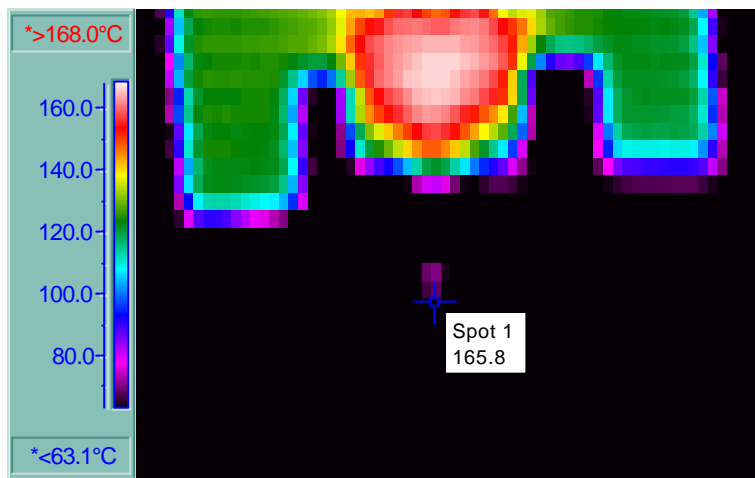
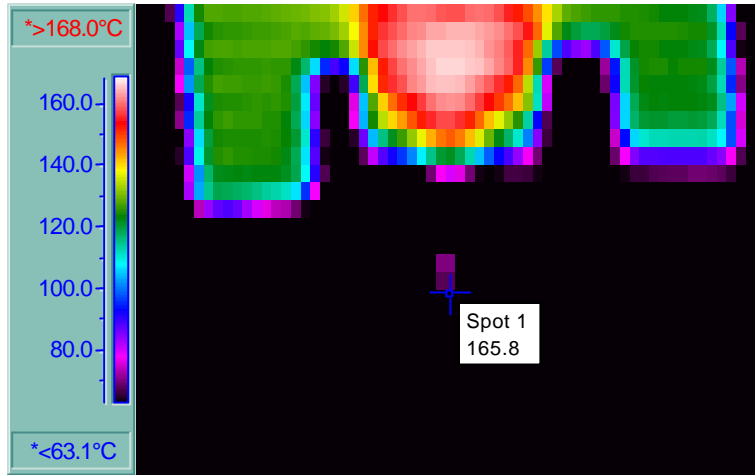


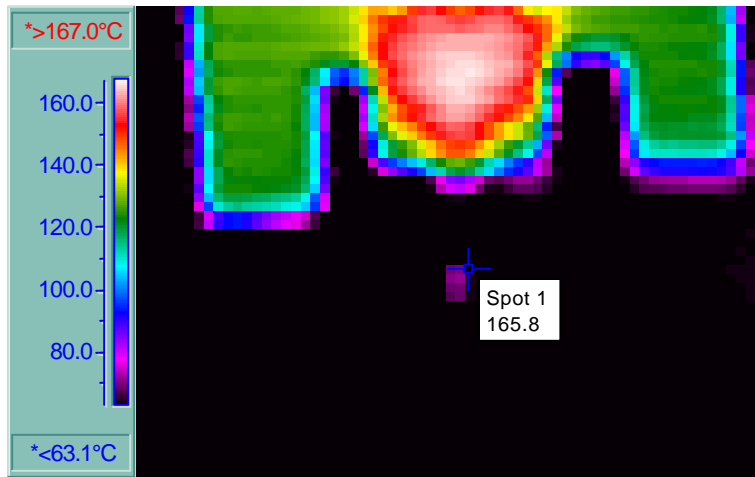
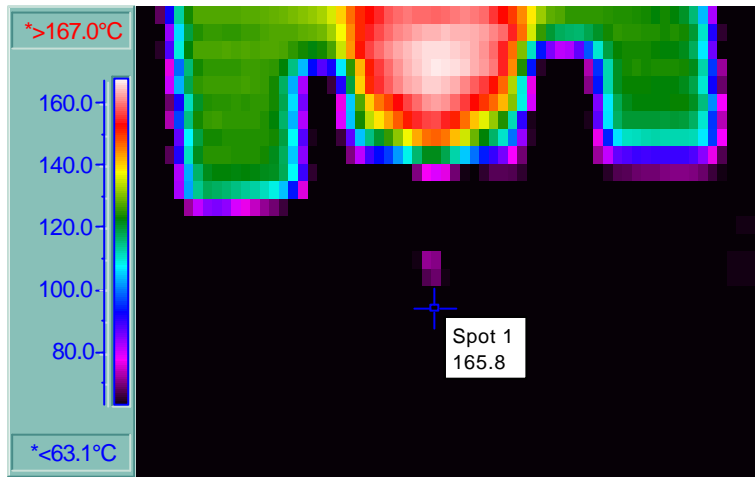
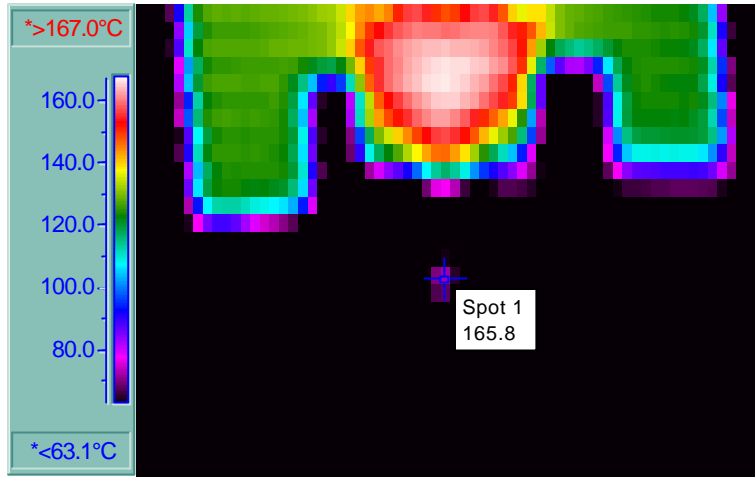


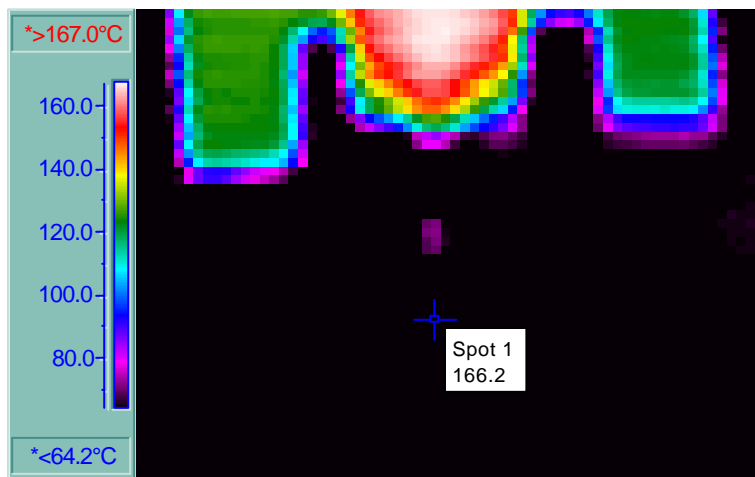
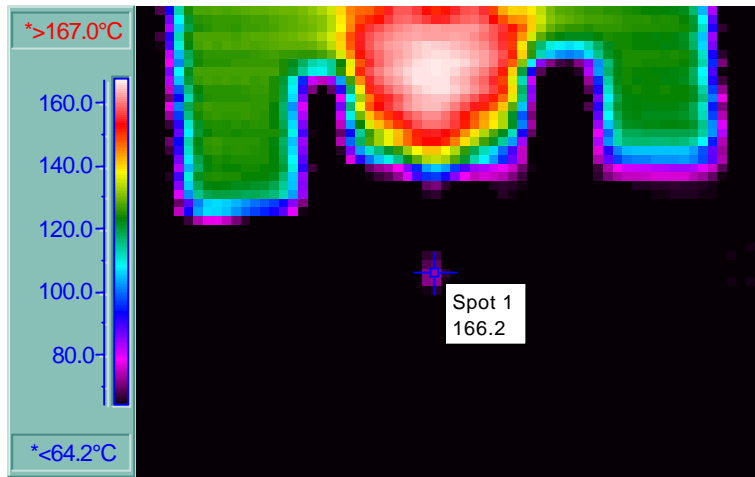
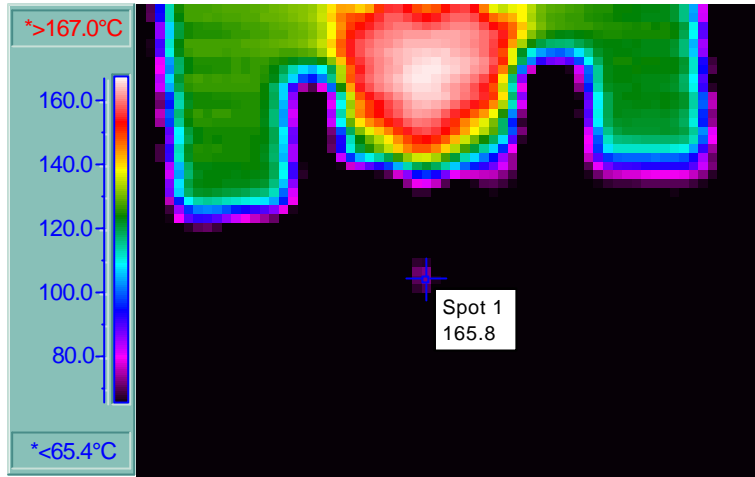


ALETA

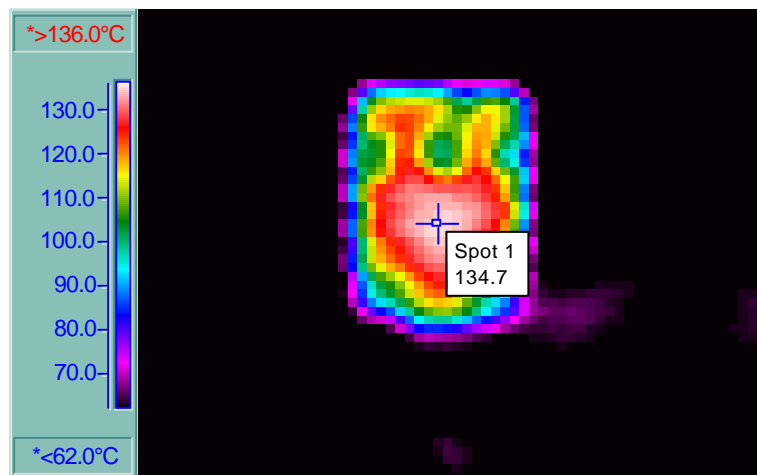
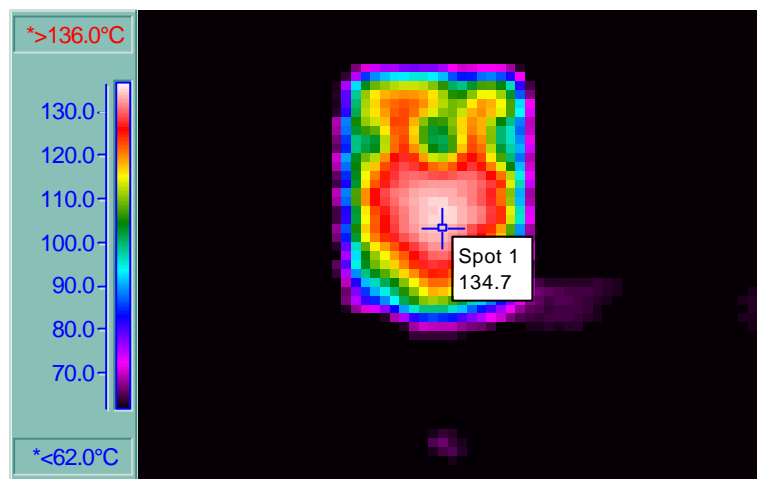
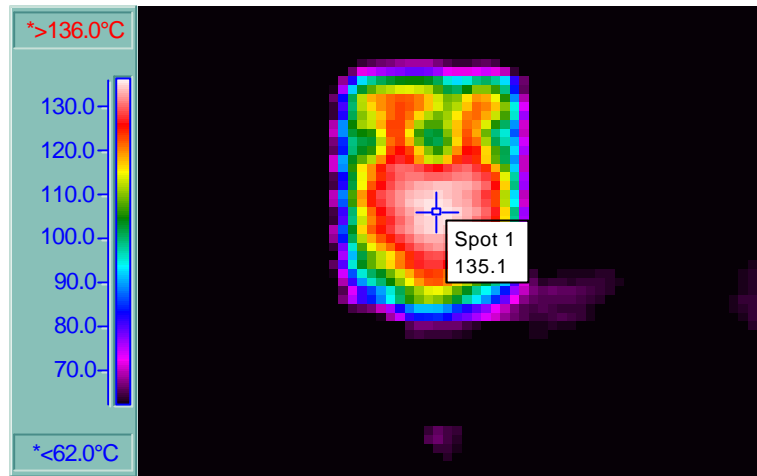


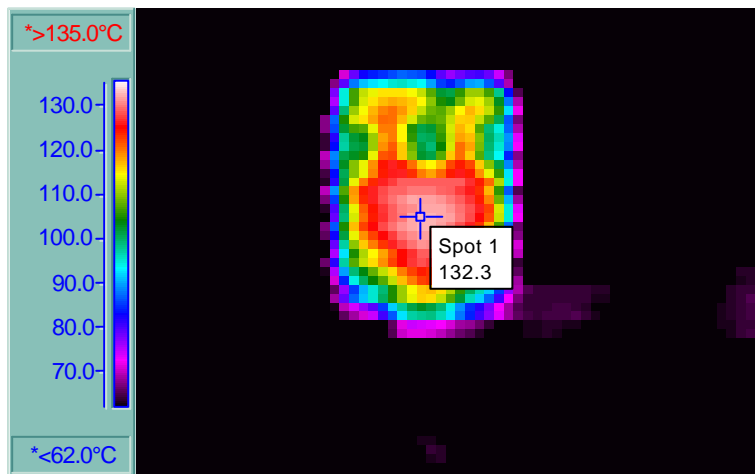
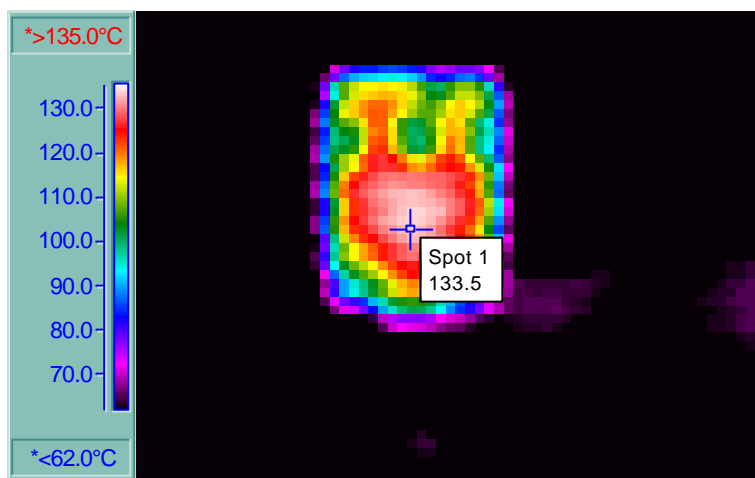
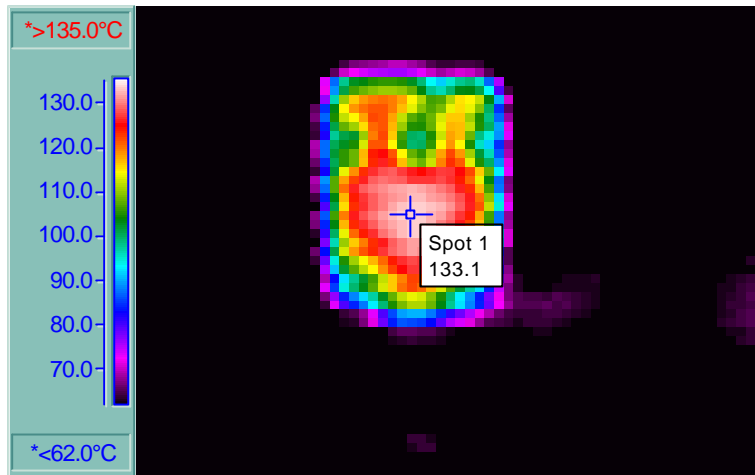


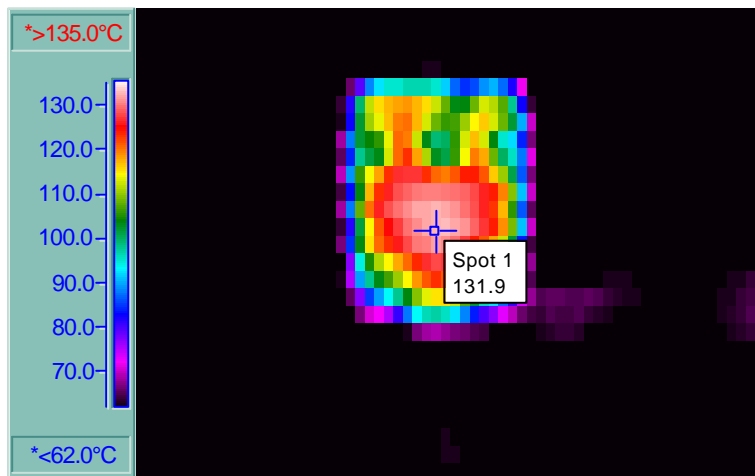
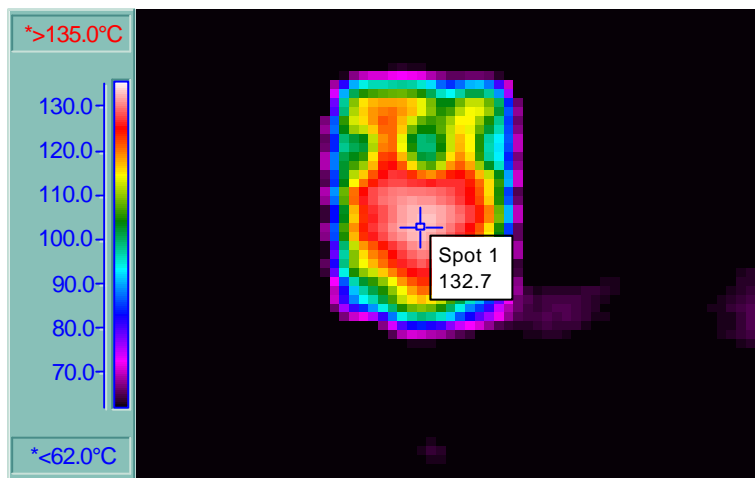
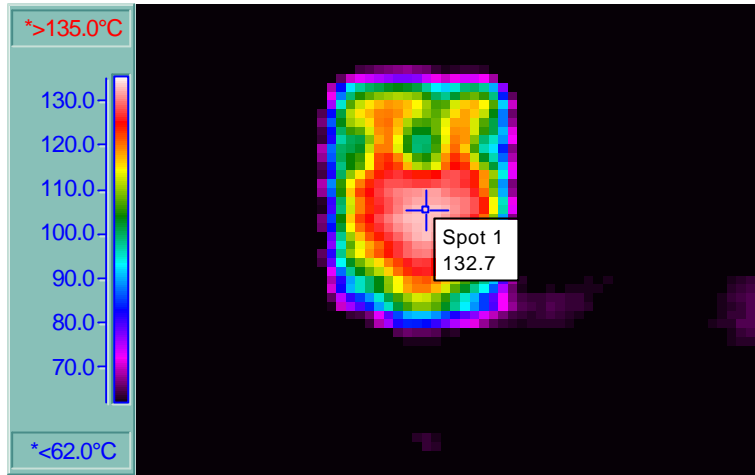


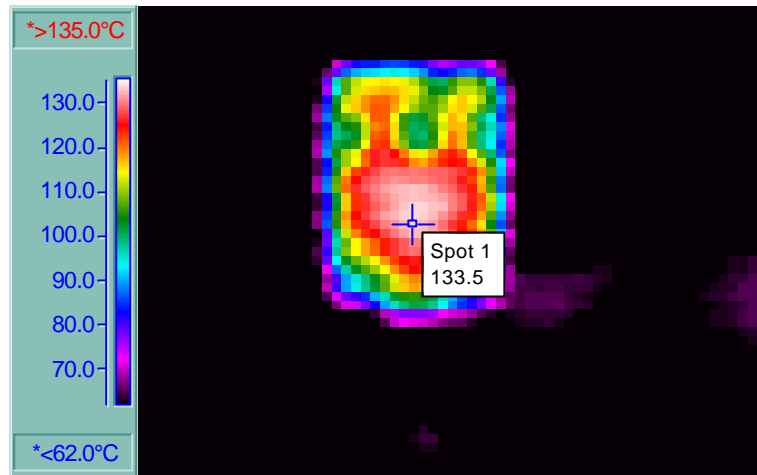


VENTILADOR

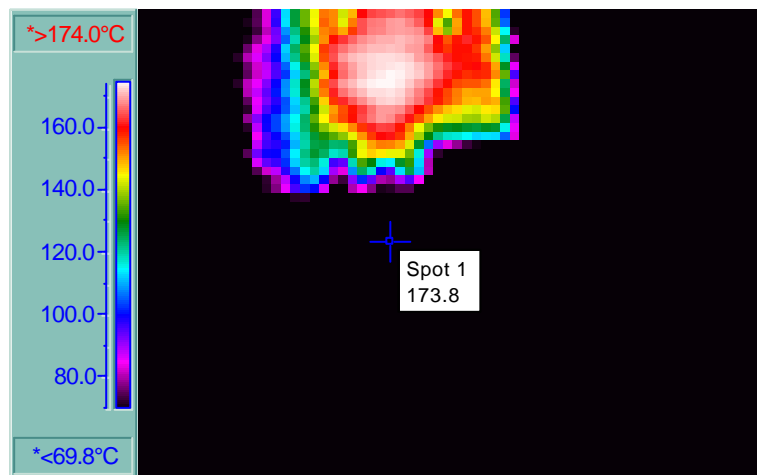
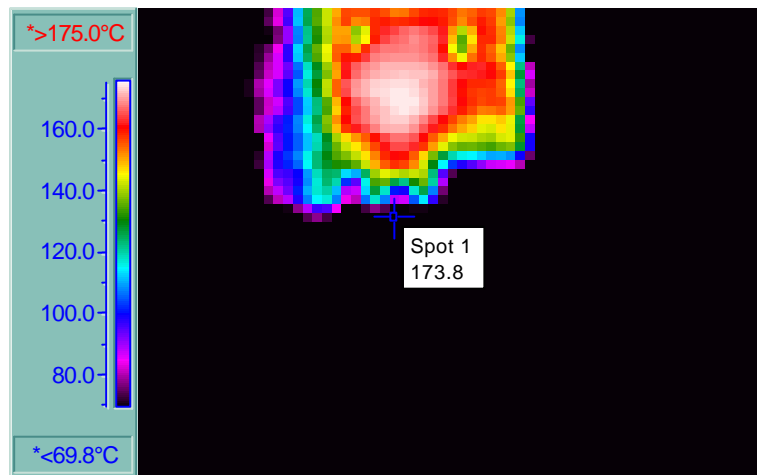


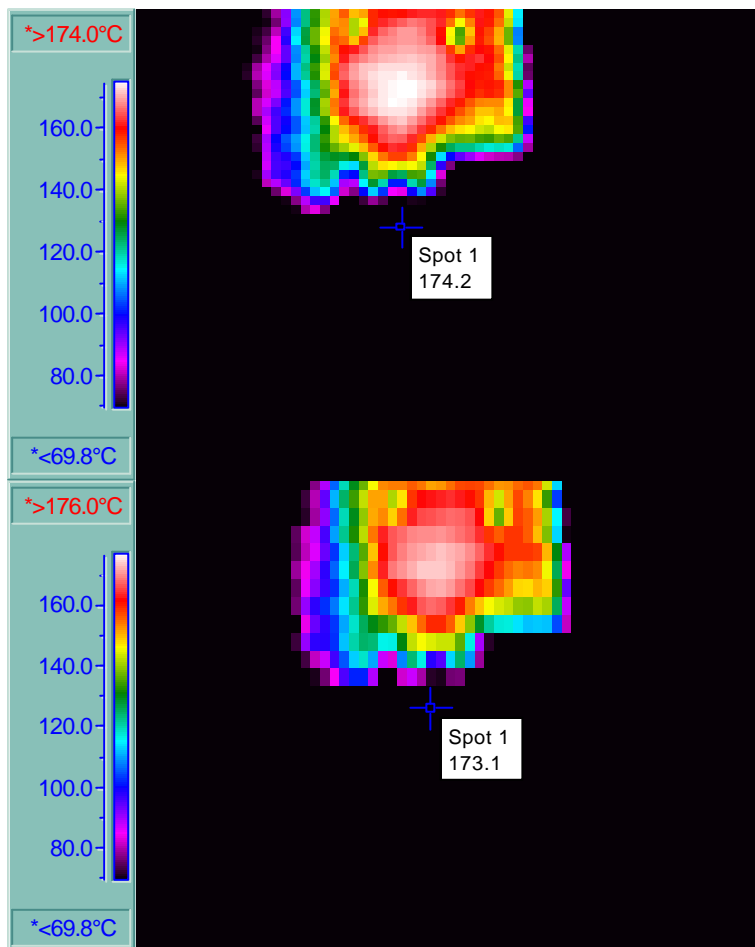
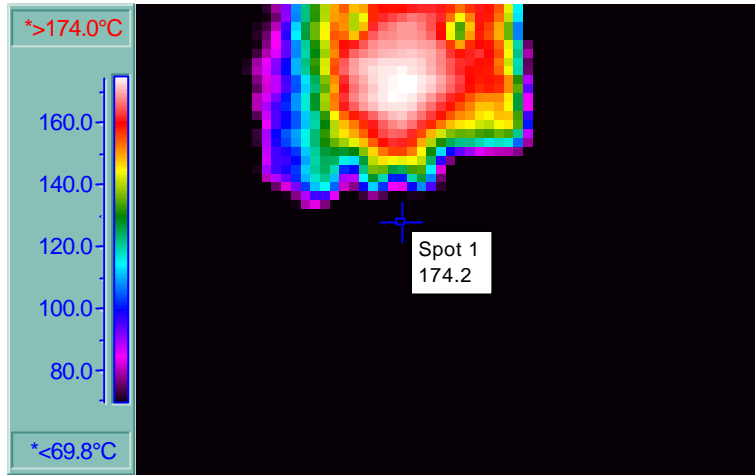


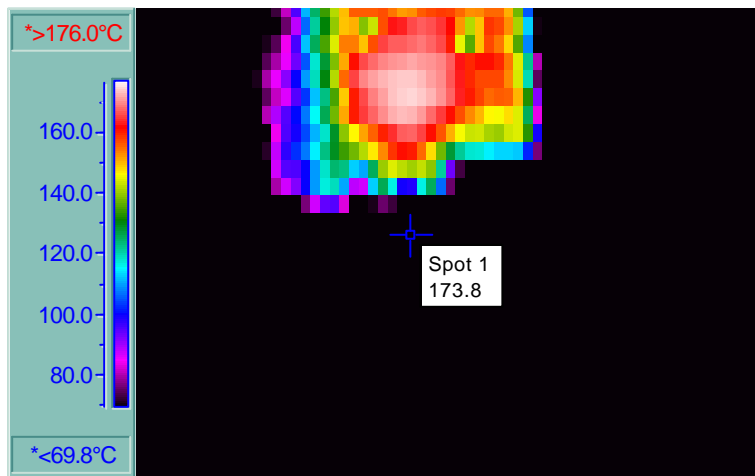
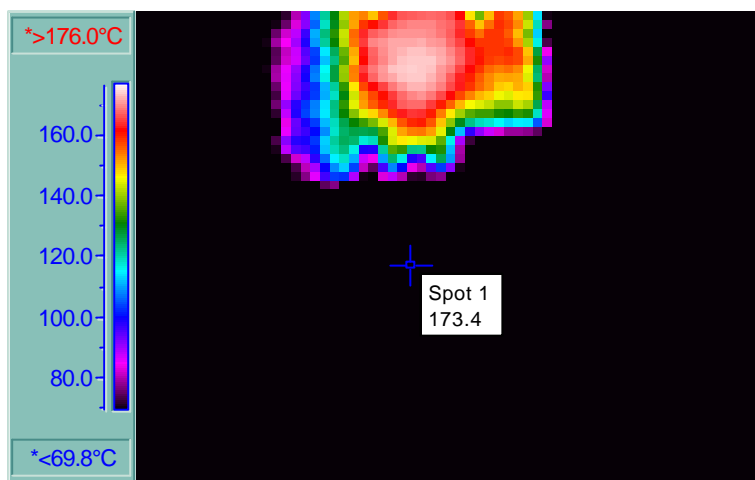
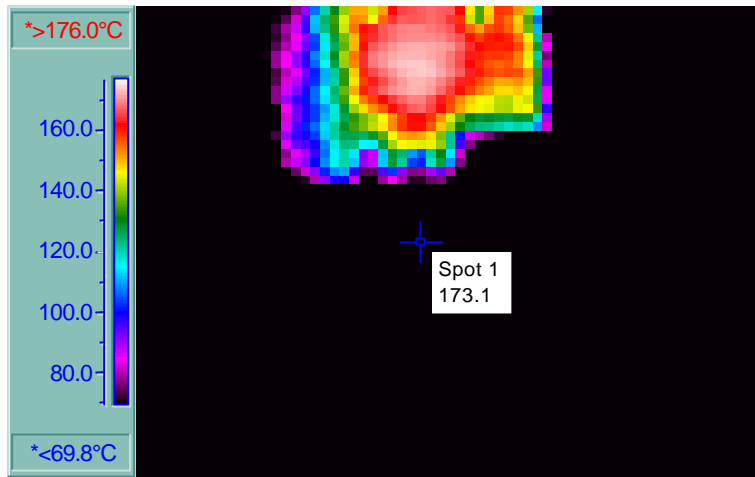


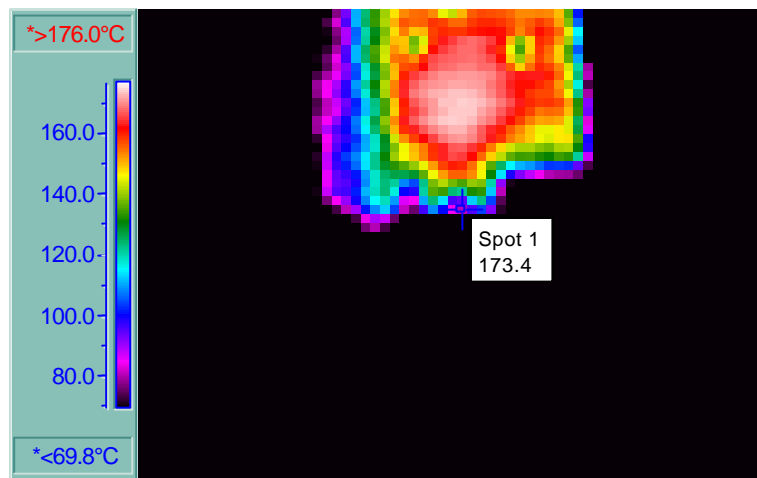
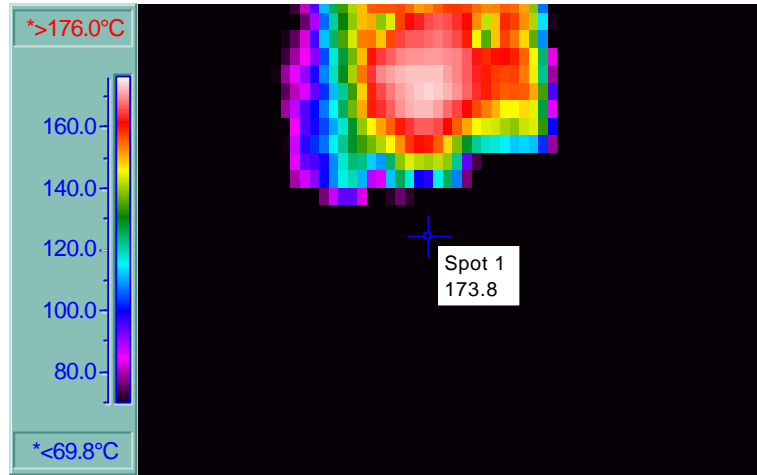


TPTC



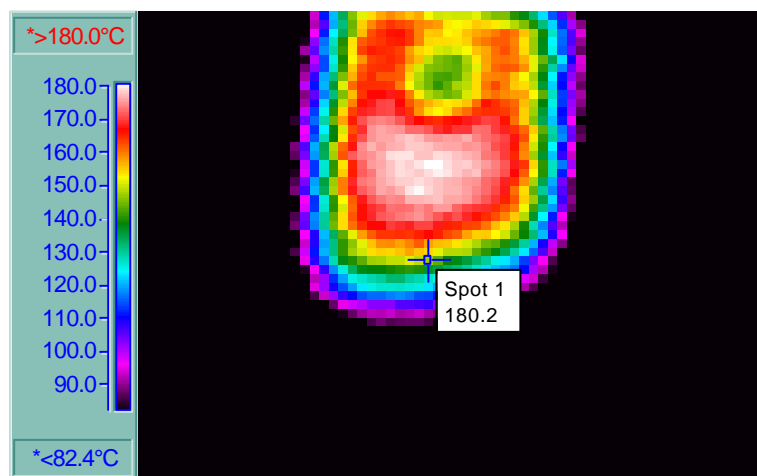


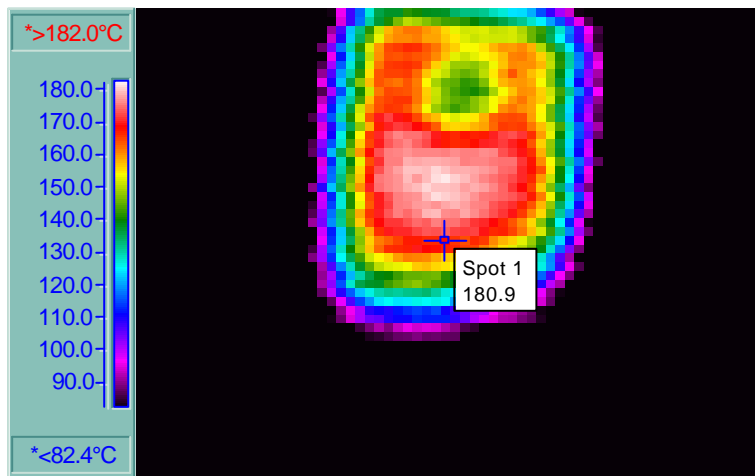
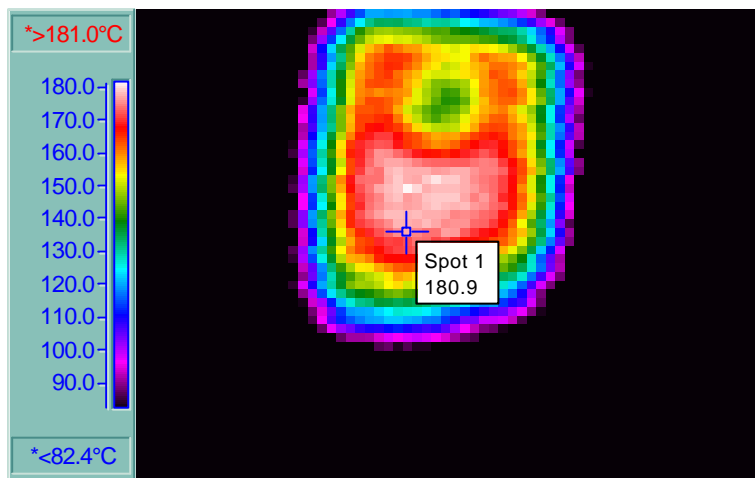
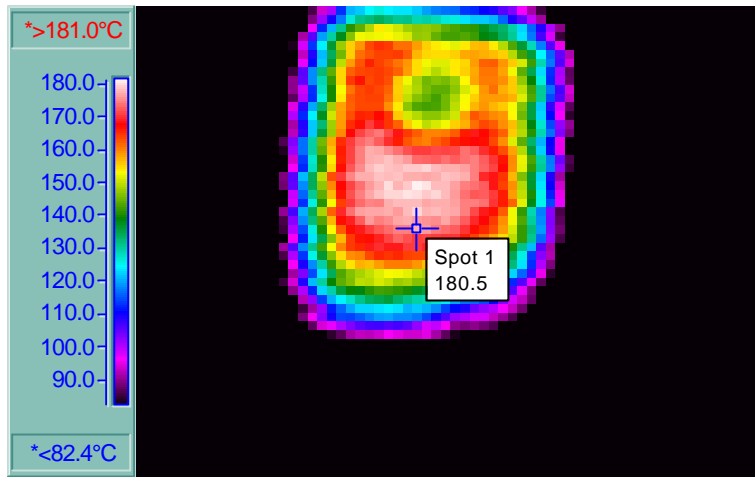


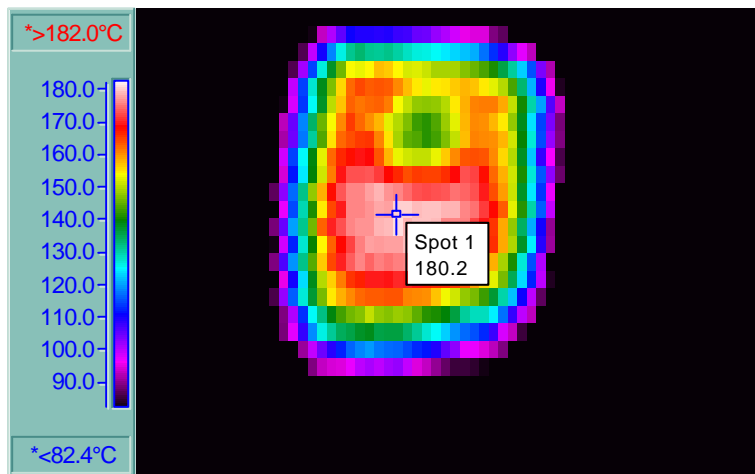
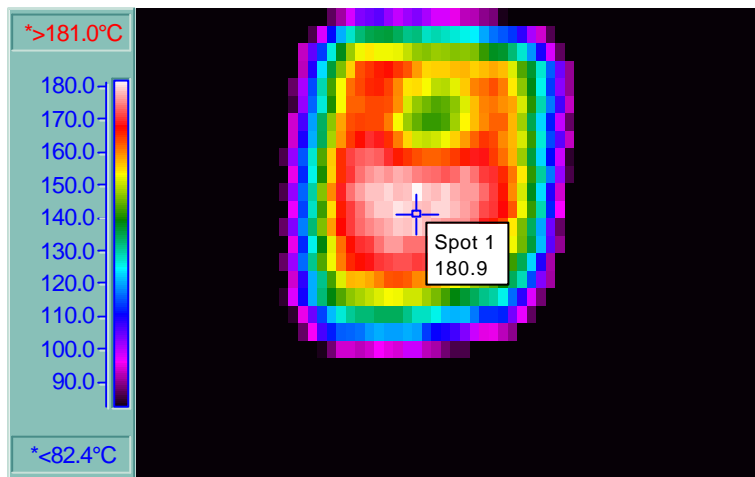
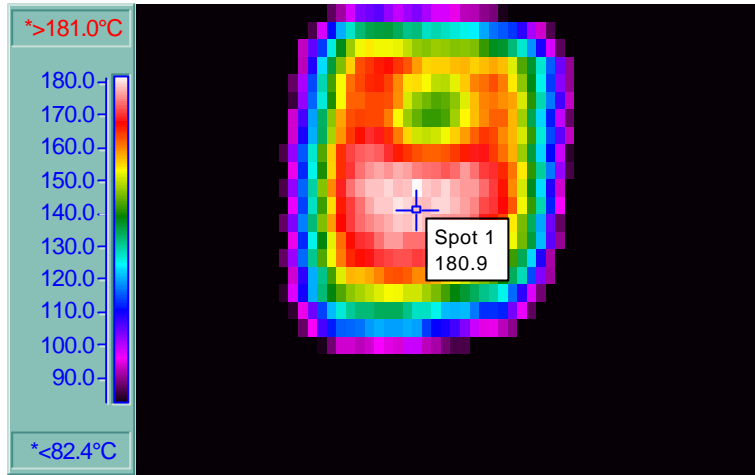


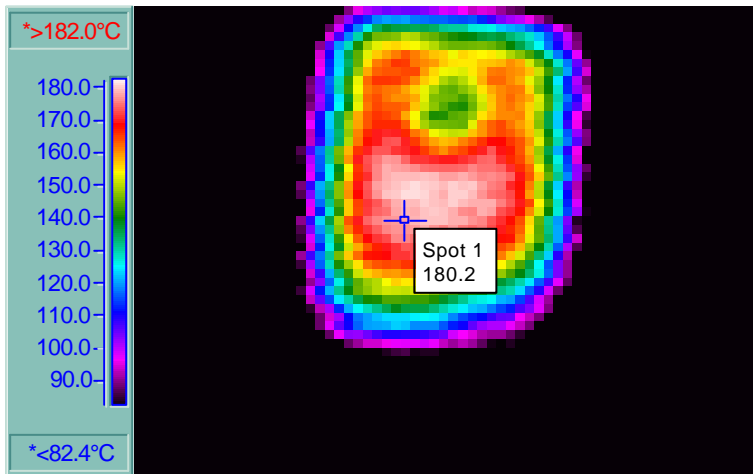
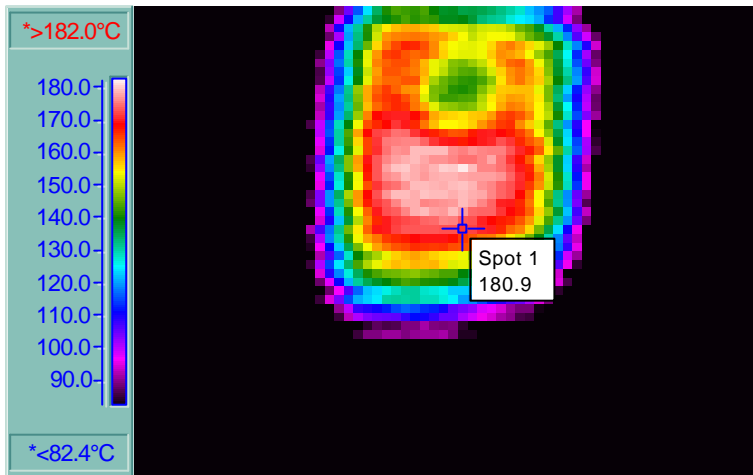
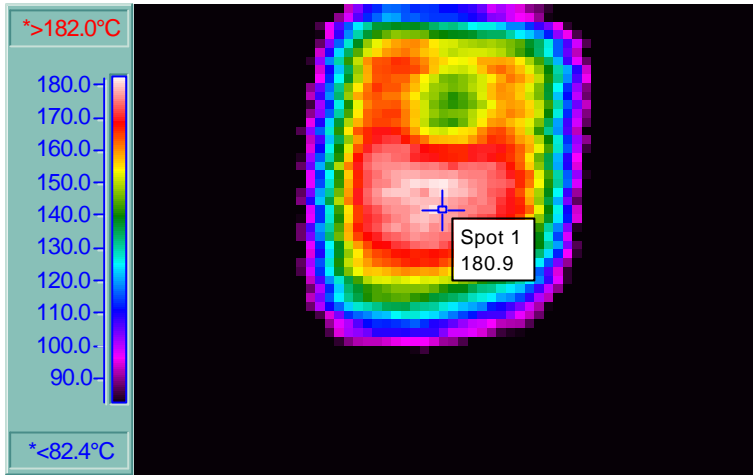
POTENCIA BAJA

SIN DISIPADOR

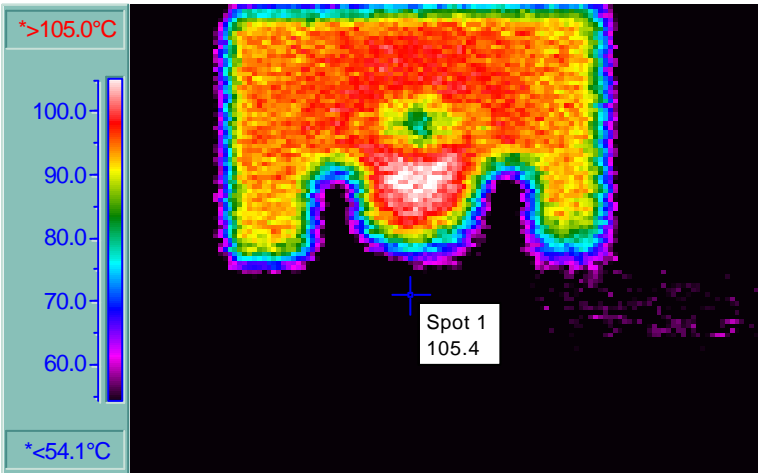
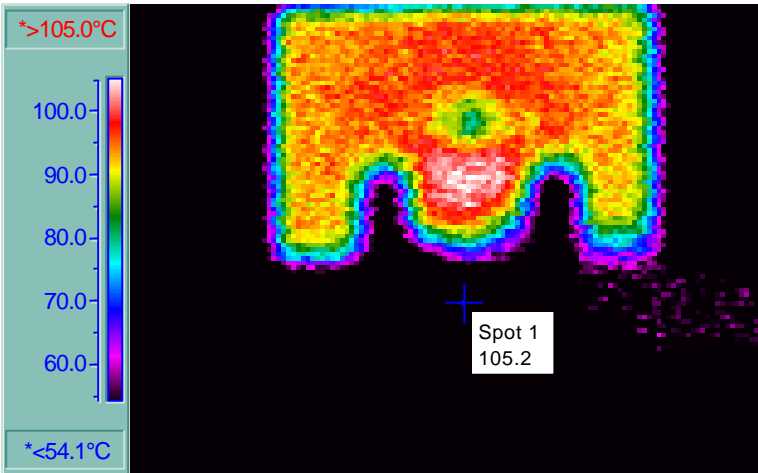
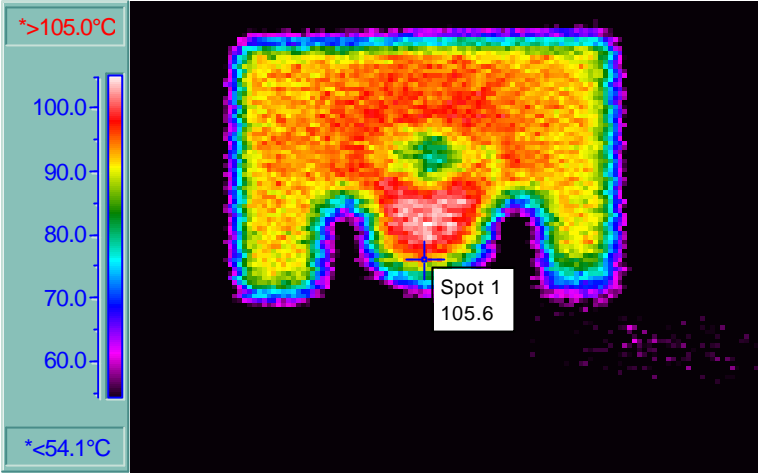


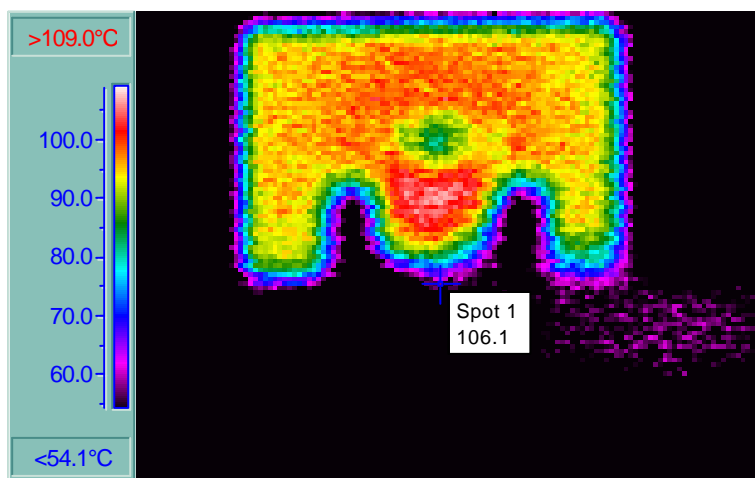
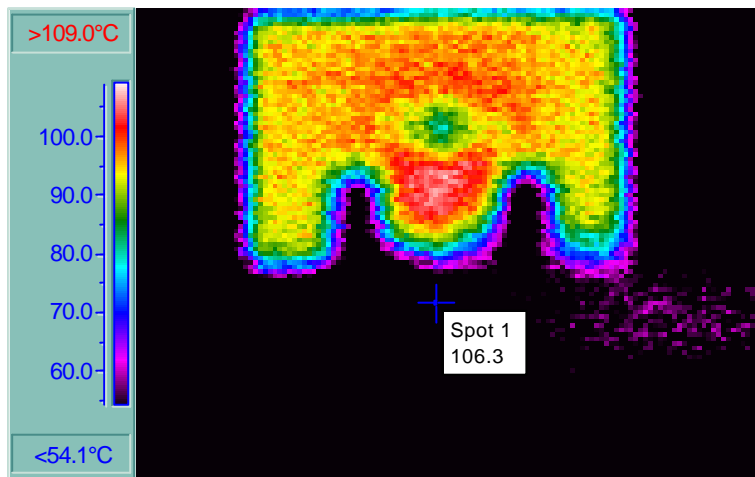
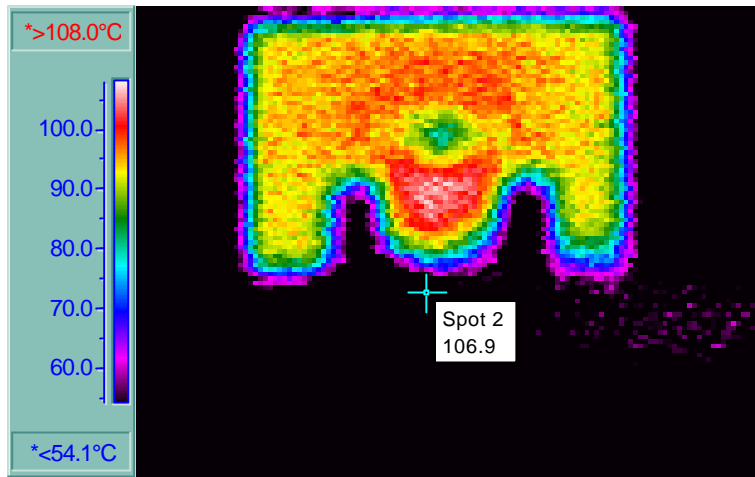


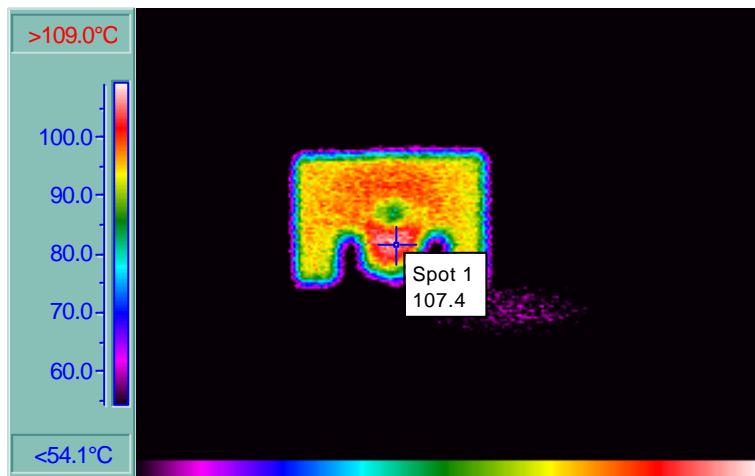
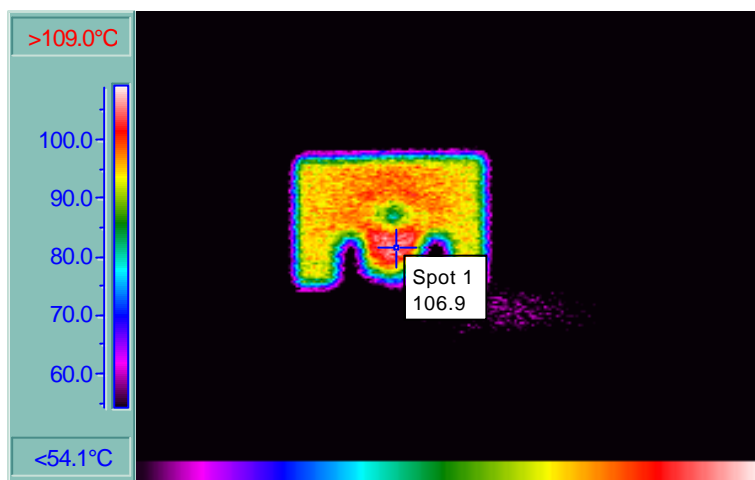
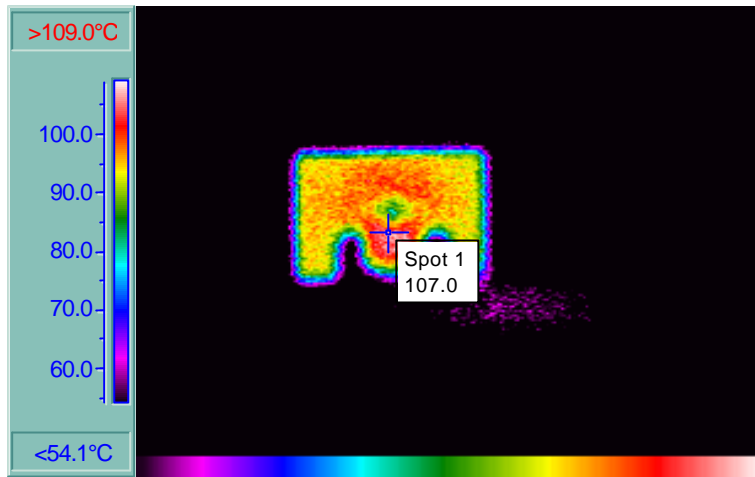


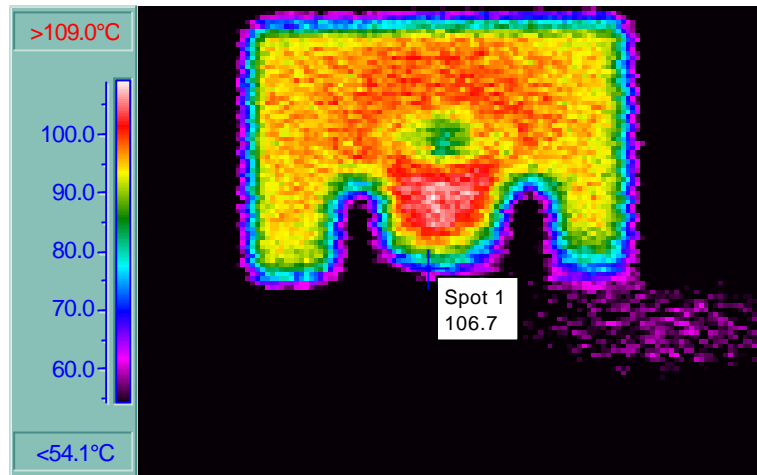


ALETA

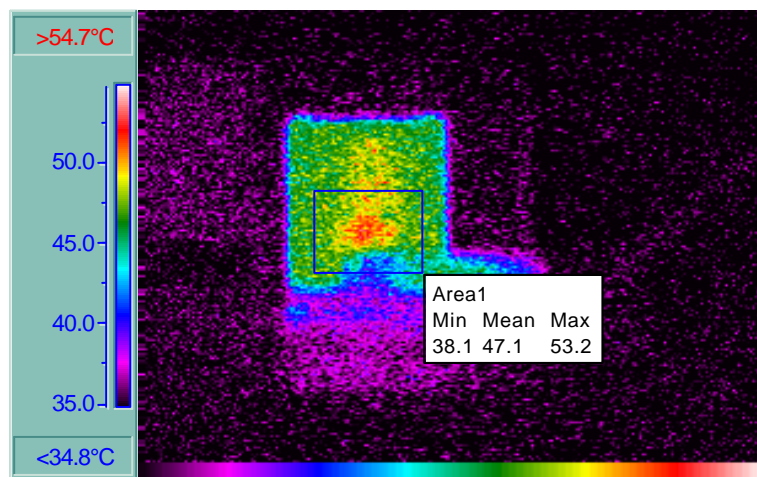
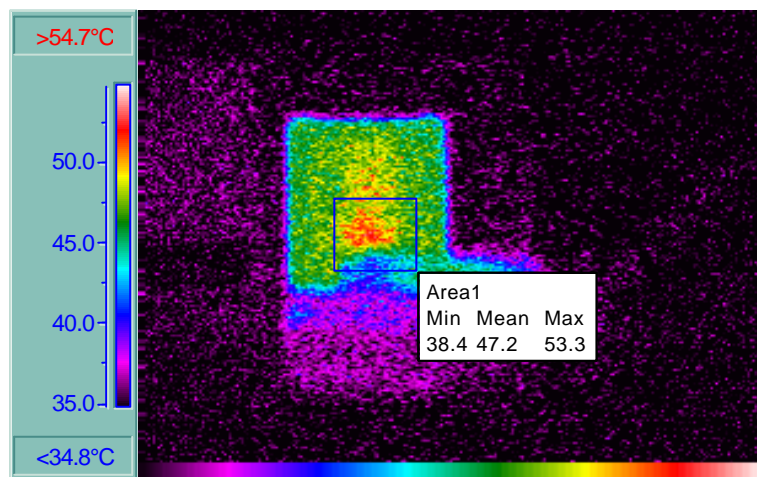


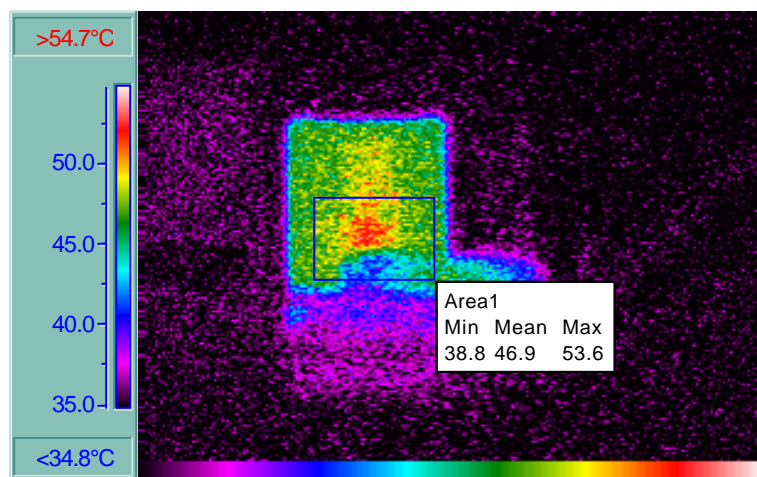
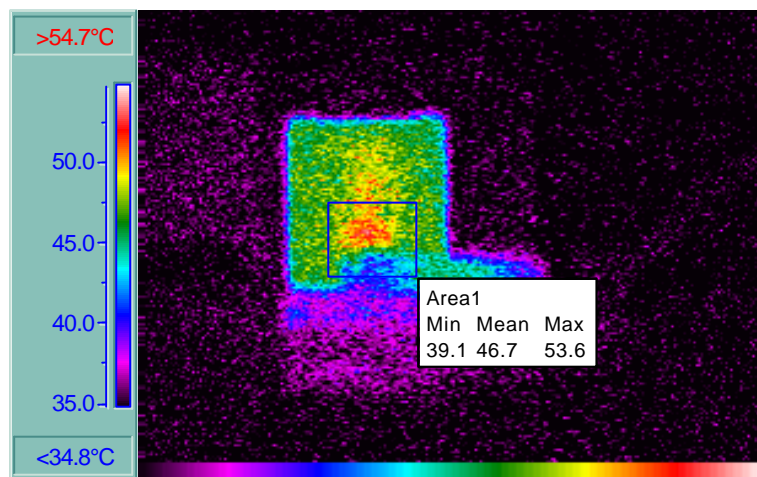
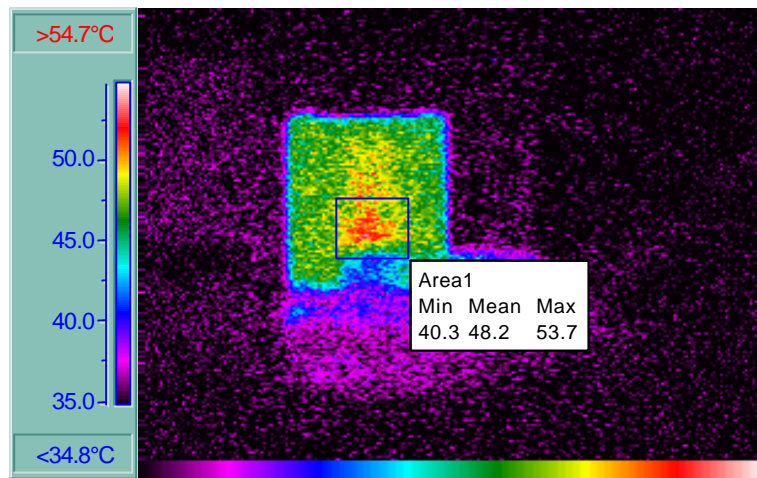


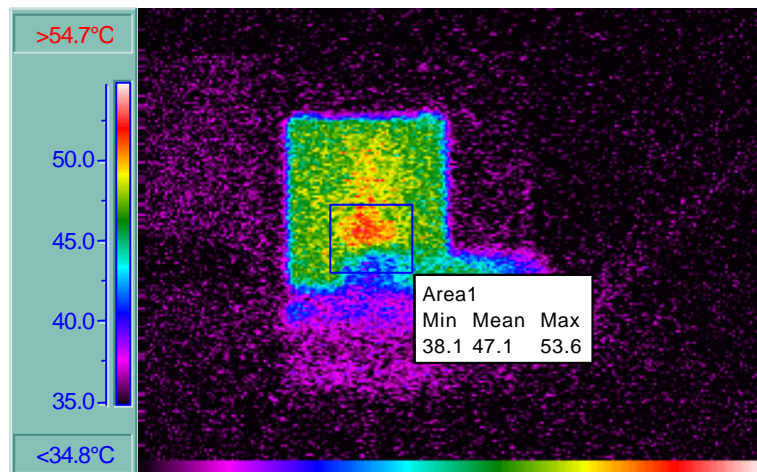
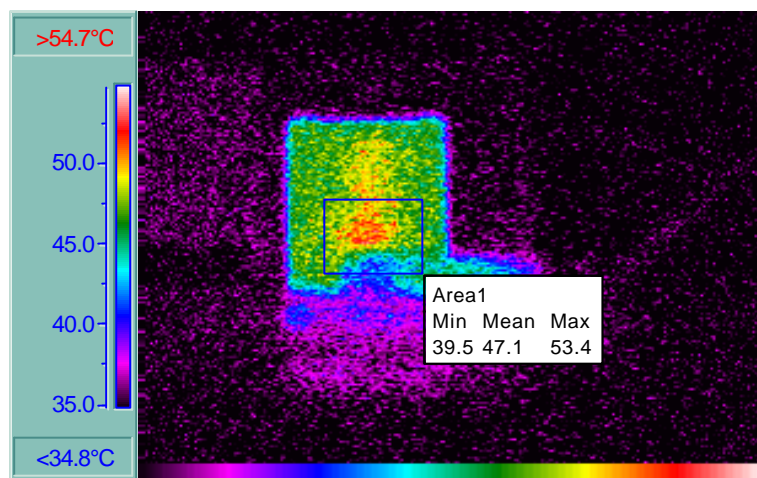
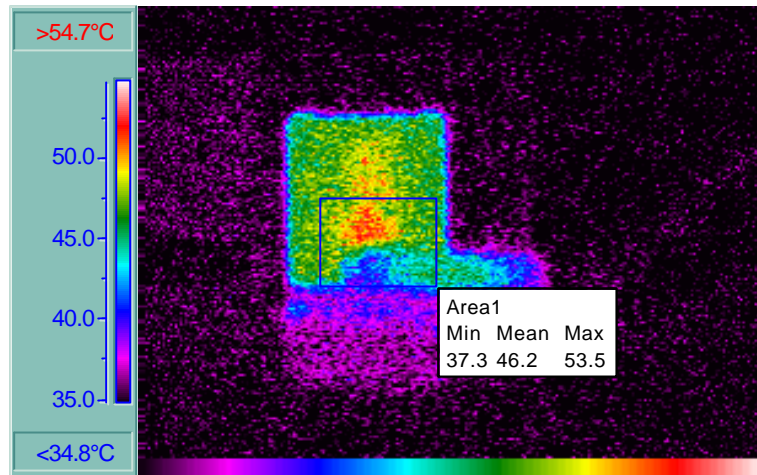


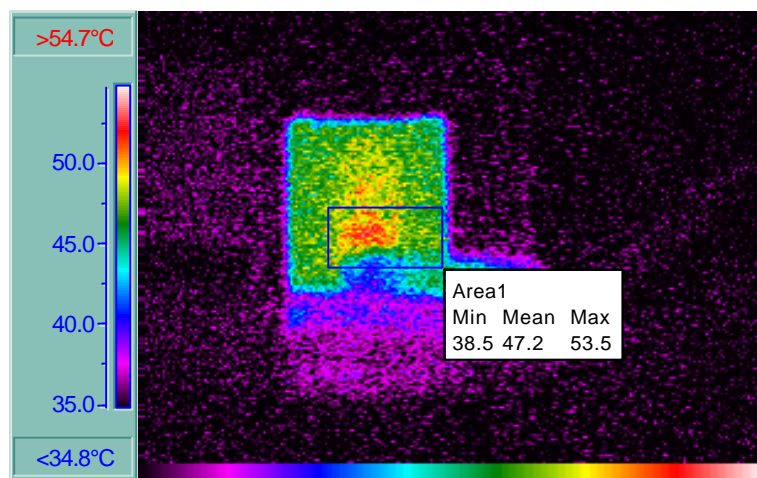
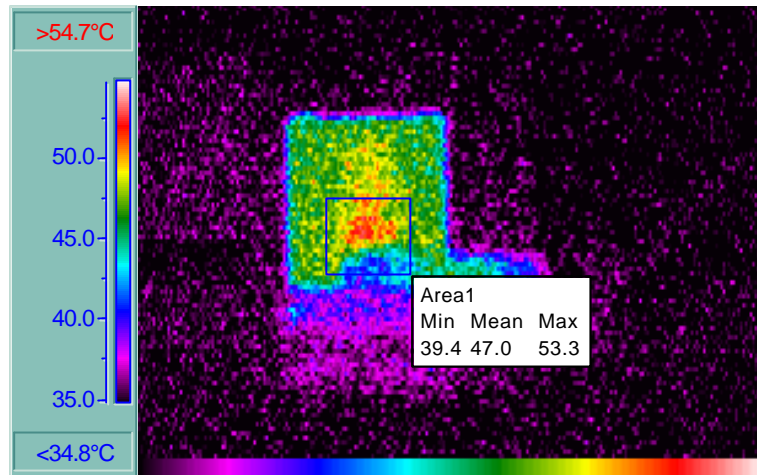


VENTILADOR

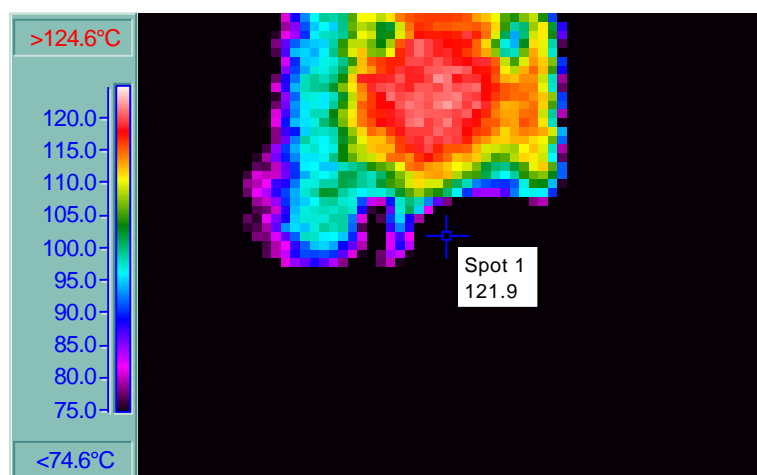


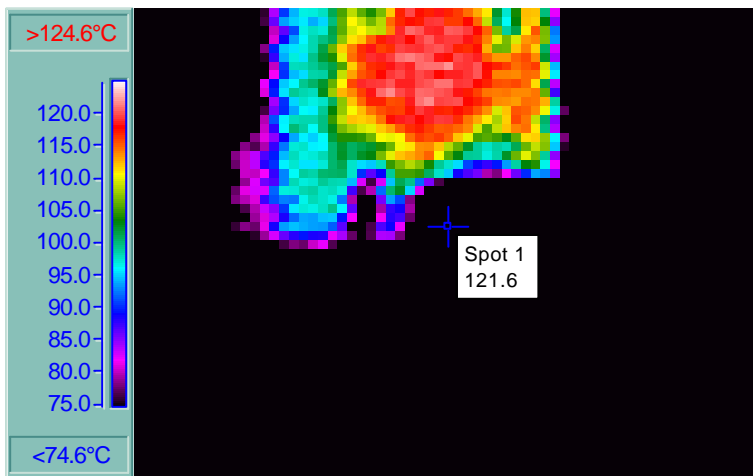
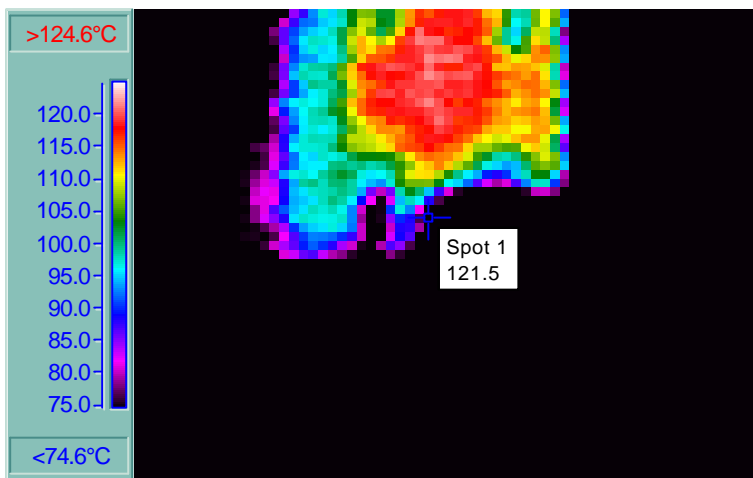
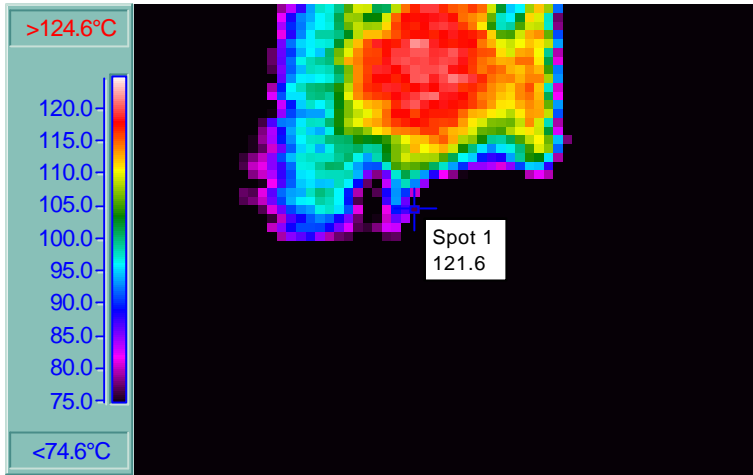


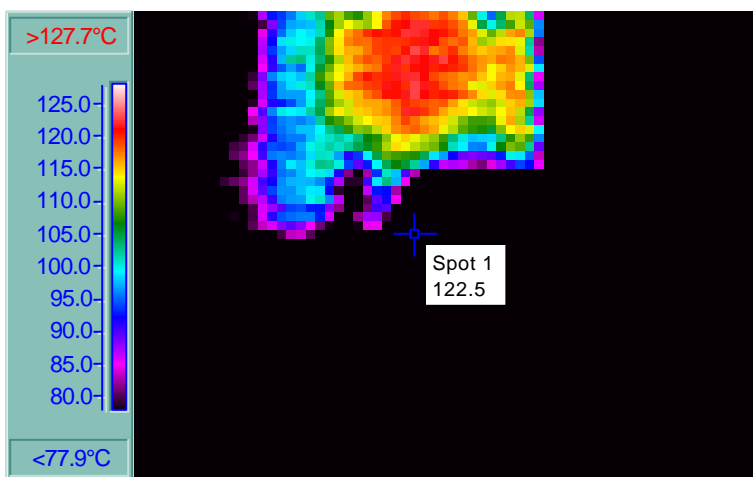
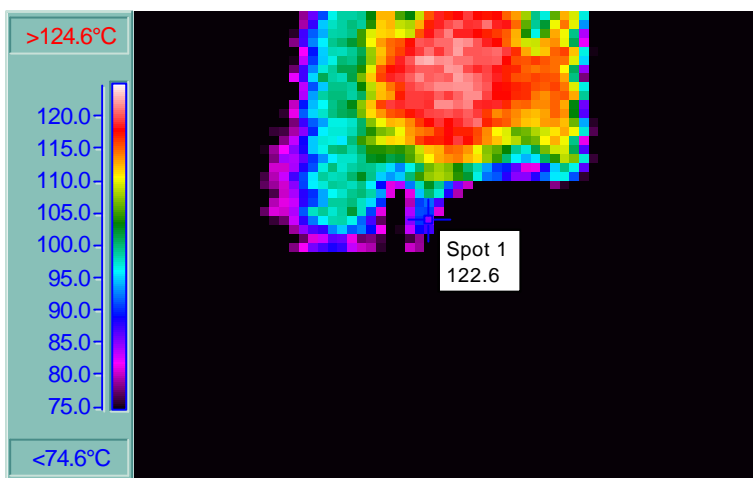
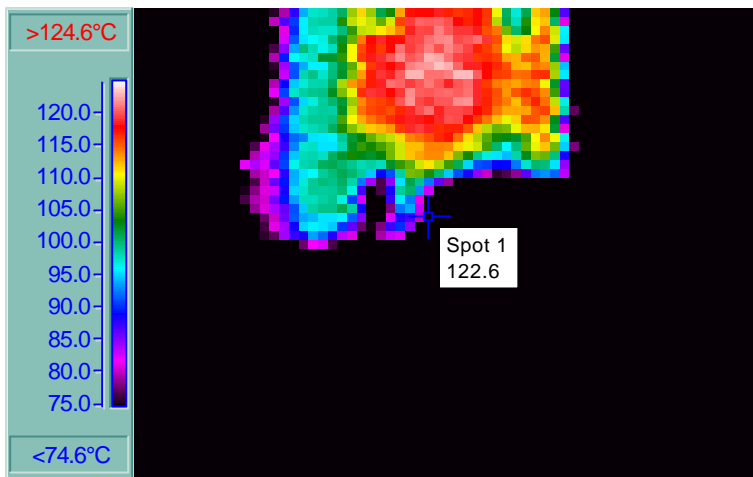


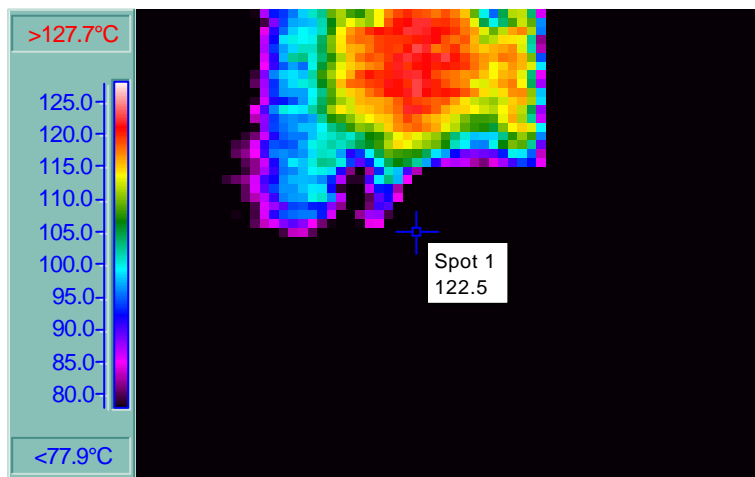
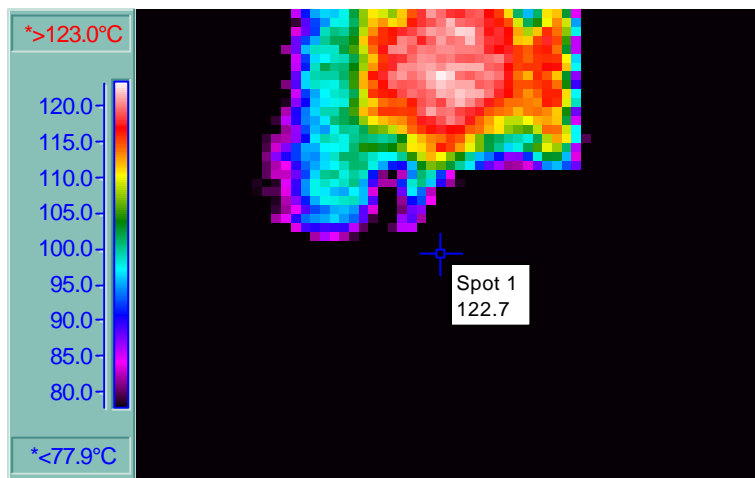
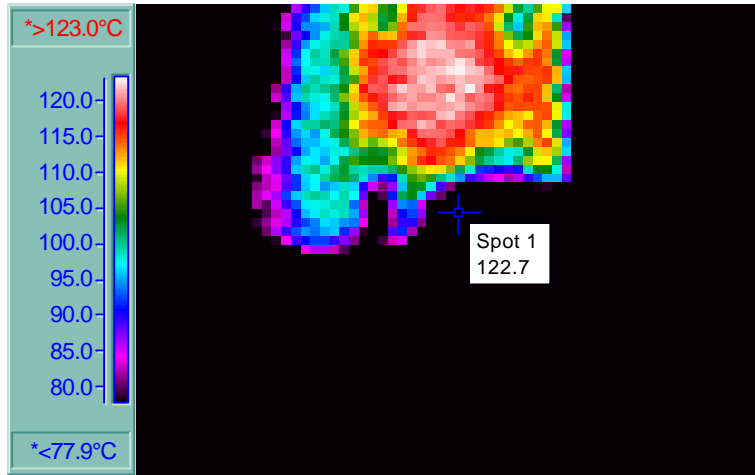


TPTC









ANEXO B. Procedimiento utilizado en la industria para la elaboración de TPTC

Tomada de URL: http://www.swales.com/products/hp_rad_panels.html

