

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**MEJORA DEL DISEÑO DEL MÓDULO TERMO-MECÁNICO DE UN
TERMOCICLADOR PARA USO EN BIOLOGÍA MOLECULAR**

Tesis para optar el Título **de Ingeniero Mecánico**,
que presenta el bachiller:

Natalya Mercedes Huarcaya Victoria

ASESOR: Rosendo Franco Rodriguez

Lima, noviembre del 2014

RESUMEN

Un termociclador es un equipo utilizado en biología molecular para amplificar fragmentos del ADN, a través del proceso de Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR). El desarrollo de la presente tesis comprende la mejora del diseño de un prototipo previamente desarrollado, de los componentes del sistema termo-mecánico de un termociclador, entre los que cabe mencionar: bandeja portamuestras, células peltier, disipador, ventilador, carcasa y tapa. Para el diseño de los componentes, se tendrán en cuenta los estudios previos con el objetivo general de realizar las mejoras del diseño del sistema termo-mecánico de un termociclador, para especificar un modelo integral de buen funcionamiento. La metodología seguida consta de cuatro etapas importantes, siendo la primera la identificación de las necesidades del equipo para lograr el proceso. Seguidamente se identificó los posibles parámetros de mejora con respecto al prototipo desarrollado, en donde lo más resaltante fue el nuevo concepto de una tapa y una carcasa con una serie de características que satisfagan las necesidades identificadas, para lo cual se realizaron cálculos analíticos del nuevo diseño. Además para esta etapa se verificó que los componentes previamente diseñados puedan ser reutilizados para la elaboración de un nuevo prototipo mediante cálculos analíticos, encontrando que la mayoría de componentes ya analizados, a excepción del disipador, satisface las necesidades actuales. En la tercera etapa, mediante la ayuda de herramientas de simulación se corroboró los cálculos analíticos desarrollados en la etapa previa y se corroboró que el modelo de diseño mejorado propuesto satisface las necesidades. Finalmente se elaboraron planos del diseño mejorado propuesto para establecer una lista de materiales y estimar el costo de fabricación del mismo, así como las recomendaciones para su fabricación y posterior ensamblaje.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO : **MEJORA DEL DISEÑO DEL MÓDULO TERMO-MECÁNICO DE UN TERMOCICLADOR PARA USO EN BIOLOGÍA MOLECULAR**

ÁREA : Diseño

PROPUESTO POR : Dr. Rosendo Franco Rodríguez

ASESOR : Dr. Rosendo Franco Rodríguez

TESISTA : Natalya Mercedes Huarcaya Victoria

CÓDIGO : 20060381

FECHA : 14 de octubre de 2014

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Un Termociclador es un equipo utilizado en el campo de la biología molecular, capaz de replicar y multiplicar muestras de ADN a partir de la reacción en cadena de la polimerasa o PCR. Para lograr esta reacción se requiere imponer a la mezcla con la muestra de ADN un ciclo térmico preciso, que está compuesto por varias etapas continuas de calentamiento y enfriamiento a alta velocidad. En el Perú aún no se fabrican estos equipos, por lo que el acceso a los mismos es limitado, y por ende sus múltiples aplicaciones. En tal sentido la PUCP ha impulsado proyectos de investigación relacionados al tema, lográndose avances significativos en el desarrollo de un prototipo de termociclador. No obstante, existen aún deficiencias que deben ser mejoradas para lograr el funcionamiento correcto de este prototipo. En la presente tesis se plantearán las mejoras que deben realizarse en el módulo termo-mecánico del termociclador que se está desarrollando en la PUCP, con la finalidad de lograr su correcto funcionamiento. Para ello se propone como objetivo general de la tesis realizar las mejoras de diseño necesarias en el módulo termo-mecánico del termociclador PUCP que garanticen su correcto funcionamiento.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**MEJORA DEL DISEÑO DEL MÓDULO TERMO-MECÁNICO DE UN
TERMOCICLADOR PARA USO EN BIOLOGÍA MOLECULAR**

Introducción

1. Estado del arte y antecedentes del proyecto.
2. Mejora del diseño y cálculo analítico de los componentes a mejorar.
3. Verificación del módulo termo-mecánico mediante simulación computacional.
4. Análisis de costos y recomendaciones para la fabricación.

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Dr. Rosendo Franco Rodríguez

Asesor



Este trabajo está dedicado a mis padres, que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, a su gran motivación y apoyo incondicional.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área, m^2
A_c	área de sección transversal, m^2
Bi	número de Biot
c_p	calor específico a presión constante, $J/kg \cdot K$
D	diámetro
h	coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2 \cdot K$
k	conductividad térmica, $W/m \cdot K$
L	longitud característica, m
m	masa, kg
Nu	número de Nusselt
Pr	número de Prandtl
Q	calor, W
q	flujo de calor, W/m^2
Re	número de Reynolds
T	temperatura, $^{\circ}C$
t	tiempo
V	volumen, m^3
v	velocidad, m/s
β	coeficiente de expansión térmica volumétrica, K^{-1}
θ	diferencia de temperaturas, K
μ	viscosidad dinámica, $kg/s \cdot m$
ν	viscosidad cinemática, m^2/s
ρ	densidad, kg/m^3
t	segundos, s

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1: ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Ácido Desoxirribonucleico.....	4
1.3 Replicación del ADN.....	6
1.4 Termociclador.....	9
1.5 Componentes mecánicos del Termociclador.....	12
1.5.1 Bandeja portamuestras.....	12
1.5.2 Células Peltier.....	13
1.5.3 Sistema Disipador-Ventilador.....	16
1.5.4 Carcasa.....	17
1.5.5 Tapa.....	17
1.6 Antecedentes del proyecto.....	17
1.6.1 Bandeja portamuestras.....	18
1.6.2 Célula Peltier.....	18
1.6.3 Sistema disipador-ventilador.....	19
1.6.4 Carcasa.....	20
1.6.5 Tapa.....	20
1.7 Métodos analíticos a utilizar para el diseño.....	21
1.8 Métodos numéricos a utilizar para el diseño.....	26
1.8.1 Dinámica de Fluidos Computacional.....	26
1.8.2 Método de volúmenes finitos.....	27
1.8.3 Descripción del modelado en Dinámica de Fluidos Computacional en el software ANSYS V15.0.....	29

1.8.3.1 Pre-procesamiento (Setup).....	30
1.8.3.2 Solución	30
1.8.3.3 Post-procesamiento	30
CAPITULO 2: MEJORA DEL DISEÑO DEL MÓDULO TERMO-MECÁNICO DEL TERMOCICLADOR.....	32
2.1 Introducción	32
2.2 Revisión de cálculos de componentes diseñados y seleccionados del sistema.....	33
2.2.1 Bandeja Portamuestras.....	33
2.2.1.1 Comportamiento térmico de la muestra.....	34
2.2.2 Células Peltier	40
2.2.2.1 Etapa con estado estable	42
2.2.2.2 Etapa con estado transitorio	43
2.2.3 Sistema Disipador – Ventilador.....	44
2.2.3.1 Ciclo de enfriamiento de las muestras	45
2.2.3.2 Ciclo calentamiento de las muestras	48
2.3 Cálculos de componentes no analizados anteriormente	49
2.3.1 Tapa	49
2.3.1.1 Diseño general del cuerpo de la tapa	50
2.3.1.2 Aislamiento térmico.....	51
2.3.1.3 Resistencia eléctrica.....	53
2.3.2 Carcasa.....	55
2.3.2.1 Diseño general del cuerpo de la carcasa	55
2.3.2.2 Aislamiento térmico.....	58
2.3.2.3 Rejilla inferior.....	59

CAPITULO 3: VERIFICACIÓN DEL MÓDULO TERMO-MECÁNICO MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.....	61
3.1 Introducción.....	61
3.2 Procedimiento de trabajo para la simulación.....	63
3.3 Simulación del sub-sistema Bandeja-Peltier-Disipador	66
3.3.1 Descripción del problema	67
3.3.2 Modelos CAD	67
3.3.3 Generación del mallado	68
3.3.4 Ajuste de parámetros de control de simulación	71
3.3.5 Evaluación de resultados de la simulación	76
3.4 Simulación del módulo termo-mecánico	80
3.4.1 Estructura de la simulación.....	81
3.4.2 Evaluación de resultados de la simulación	86
CAPITULO 4: ANÁLISIS DE COSTOS Y RECOMENDACIONES PARA LA FABRICACIÓN	89
4.1 Introducción.....	89
4.2 Costo total de fabricación del módulo termo-mecánico	90
4.2.1 Tapa	90
4.2.2 Carcasa.....	91
4.2.3 Componentes varios	91
4.2.4 Mano de obra	92
4.2.5 Resumen de costos totales	92
4.3 Recomendaciones para la fabricación.....	93
CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	96

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, el interés que se ha generado en la genética ha ido desarrollándose conforme a la investigación que se realiza constantemente sobre ello. Gracias a estas investigaciones, se han logrado grandes avances en temas como la biología y la salud, tan importantes como prevención y diagnóstico de enfermedades como el cáncer, diabetes y otras que son de origen hereditario.

Es así que una de las grandes invenciones en genética se dio en 1983, cuando Kary Mullis, bioquímico estadounidense, desarrolla la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés, Polymerase Chain Reaction), técnica que introdujo una revolución en la investigación biológica y médica, lo que le llevó a recibir el premio Nobel de Química de 1993. Dicha técnica sirve para que de un fragmento o muestra pequeña de ADN, se obtenga una réplica mucho mayor sin alterar el código genético, lo cual ayuda en aplicaciones tales como: identificación con una muy alta probabilidad de virus o bacterias causantes de una enfermedad, identificar cadáveres o hacer investigación científica sobre el ADN amplificado (Mullis, K. & Ferré, F. 1994:12).

El ADN es una molécula que contiene valiosa información, vital para la forma de vida en la tierra: la información genética de todos los seres vivos que habitamos este planeta. Desde el redescubrimiento de las leyes de Mendel, los biólogos, bioquímicos y genetistas se han encaminado a descubrir las características de los genes, el gran avance en la búsqueda del conocimiento final de las características de esta molécula, ha traído como consecuencia los importantes desarrollos en ingeniería genética, biología molecular, medicina, etc. Un gran aporte son los avances en otras disciplinas como la Bioinformática y la automatización; que han permitido descifrar el Genoma Humano y hoy los estudios en este proyecto apuntan a la búsqueda de los aspectos funcionales del ADN del ser humano.

En la actualidad existen equipos que son capaces de replicar muestras de ADN, estos se llaman Termocicladores y están definidos como un equipo electrónico que permite realizar los ciclos de temperaturas necesarias para una “Reacción en cadena de la

polimerasa” o PCR. Esta reacción presenta varios ciclos, en los cuales se realiza la multiplicación in vitro de una secuencia de ADN mediante procesos continuos de calentamiento y enfriamiento a alta velocidad.

En el Perú no existe la fabricación de estos equipos, lo cual hace que únicamente se importen. Los problemas que surgen de no tener producción local, son por ejemplo, no contar con soporte tecnológico, aumento de costos, menor avance en investigaciones biológicas, entre otros. Es por ello que para satisfacer esta necesidad, los grupos de investigación Equi-Lab e INACOM se plantearon realizar los diseños de las partes termoeléctrica y electrónica del termociclador, contemplando aspectos como el módulo electrónico, software de desarrollo y características de componentes mecánicos, mediante el desarrollo de diversas tesis para su investigación.

A lo largo de la investigación realizada por los grupos de nuestra casa de estudios, se han logrado avances significativos en prototipos para la fabricación integral del termociclador. No obstante, existen aún deficiencias que impiden el funcionamiento correcto de este equipo, comparados con modelos de fabricantes especializados.

En este trabajo de tesis se desarrollarán las mejoras del sistema termo-mecánico del termociclador, en los componentes que poseen mayores deficiencias, es decir la tapa y la carcasa del equipo, además se realizará la selección y validación de los componentes previamente definidos, para garantizar el funcionamiento integral del equipo.

Para lograr solucionar los problemas identificados, se establecerán fundamentos teóricos, los cuales serán cumplidos a lo largo de los capítulos establecidos para este documento. El primer capítulo lo conformará el estado del arte, en el cual se conocerán las tecnologías e información actuales acerca del termociclador. Seguidamente, en el segundo capítulo se presentará la propuesta de mejora del diseño del módulo termo-mecánico del termociclador. En el tercer capítulo, se realizará la verificación de los componentes del módulo termo-mecánico del termociclador, mediante el apoyo de herramientas de simulación, y finalmente en el cuarto capítulo se abordará los aspectos de análisis de costos y recomendaciones para la fabricación.

El objetivo general de la tesis es:

- Realizar las mejoras del diseño del sistema termo-mecánico de un termociclador, para especificar un modelo integral de buen funcionamiento.

Como objetivos específicos se tienen:

- Revisar los cálculos previos para verificar los componentes seleccionados.
- Mejorar el diseño de la tapa para asegurar la hermeticidad de la cavidad donde se encuentran las muestras y la uniformidad de temperaturas.
- Mejorar el diseño de la carcasa, previendo el correcto ensamblaje de todos los componentes del módulo y las conexiones que deban realizarse con los componentes electrónicos.
- Seleccionar el aislamiento térmico de la carcasa, necesario para evitar la disipación de calor al ambiente a través de la misma.
- Desarrollar la simulación computacional del conjunto para la verificación del diseño mejorado propuesto.
- Realizar los planos de ensamble y despiece del conjunto para elaborar la lista de materiales.
- Establecer los costos para la fabricación de un prototipo de módulo termo-mecánico con las mejoras propuestas.
- Indicar las recomendaciones necesarias para la fabricación y ensamblaje de un prototipo.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO

1.1 Introducción

Una de las grandes revoluciones en biología fue dada por el descubrimiento del ADN, y este hecho ha logrado grandes avances en otras disciplinas tales como el genoma humano, alimentación transgénica, clonación terapéutica, eventos científicos sociales y entre otros que están cambiando la visión del mundo.

Sin embargo, el ADN como fragmento muchas veces no es útil para la investigación de dichas disciplinas, por lo cual es muy importante la replicación de ADN.

La replicación de ADN es un proceso complejo, el cual ha sido estudiado e incluso se han desarrollado máquinas que logran este proceso mediante el uso de tecnología avanzada con apoyo en métodos de diseño de ingeniería. La máquina capaz de realizar este proceso es denominada Termociclador.

1.2 Ácido Desoxirribonucleico

En 1869 un biólogo suizo Johann Friedrich Miescher identificó un nuevo grupo de sustancias celulares a las cuales denominó nucleinas mediante un experimento.

Este experimento consistía en utilizar un alcohol caliente y luego una pepsina enzimática, que separa la membrana celular y el citoplasma de la célula. Miescher

deseaba aislar el núcleo celular, específicamente en los núcleos de las células del pus obtenidas de los vendajes quirúrgicos desechados, sometió a este material a una fuerza centrifuga para aislar a los núcleos del resto y luego sometió solo a los núcleos a un análisis químico.

Después del descubrimiento de Miescher, se sumaron diversos científicos, tales como P. A. Levene que demostró que el ADN estaba compuesto de cuatro bases nitrogenadas, dos purinas: Adenina (A) y Guanina (G), y dos pirimidinas: Citosina (C) y Timina (T), además de un azúcar de cinco carbonos, desoxirribosa y grupos fosfato [1].

El ADN es la molécula que lleva la información genética utilizada por una célula para la creación de proteínas. La función principal de las moléculas de ADN es el almacenamiento a largo plazo de la información genética. ADN es a menudo comparado con un conjunto de planos para los seres humanos.

El código genético fue un misterio hasta que los biólogos descubrieron la estructura del ADN como una escalera de caracol. El modelo de molécula fue propuesto por James Watson y Francis Crick en 1953. Este modelo establece que la información se almacena en el ADN como un código formado por cuatro bases químicas: adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). Cada peldaño de la escalera es un par de bases, una A solamente se une a una T y C sólo se une a un ADN G. es una secuencia química de estas bases en dos hebras que están enlazados para formar una doble hélice. El orden de estas bases a lo largo de una cadena de ADN que se conoce como la secuencia de ADN [2].

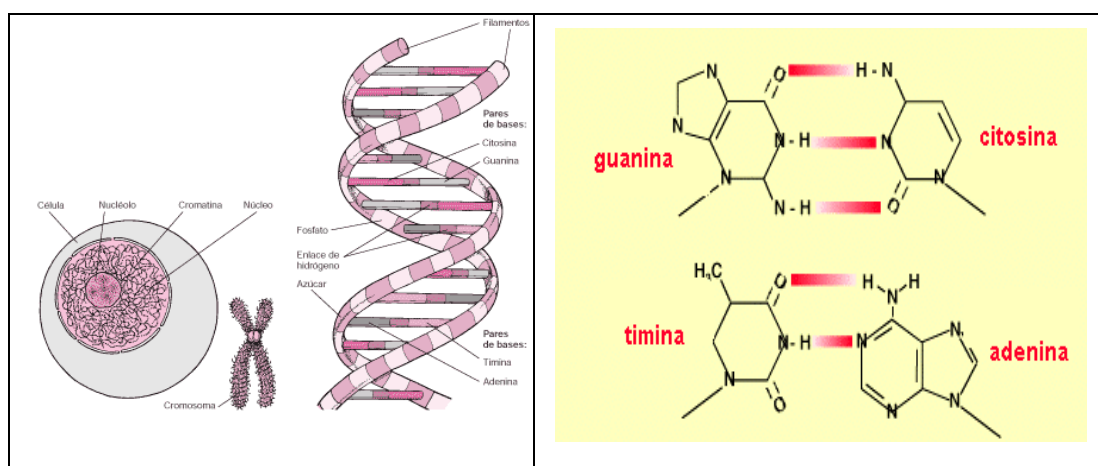


Figura 1.1. Izquierda: Forma de la molécula de ADN. Derecha: diagrama de enlaces hidrógenos para los pares adenina-timina y citosina-guanina. (Garcia, Hernández 2003)

1.3 Replicación del ADN

La reacción en cadena de la polimerasa o PCR (siglas de su nombre en inglés Polymerase Chain Reaction) permite generar una gran cantidad de copias de un fragmento de ADN (ácido desoxirribonucleico). El requisito fundamental para poder llevar a cabo la reacción es disponer de fragmentos cortos de ADN de cadena sencilla complementarios a los extremos del fragmento a amplificar. Estos fragmentos servirán como cebadores para que una enzima polimerasa sea capaz de incorporar nucleótidos complementarios a la cadena molde. Una vez completada la reacción la cantidad fragmento amplificado se puede visualizar mediante técnicas sencillas de separación de fragmentos de ADN.

Para lograr el desarrollo de la PCR, se necesitan cuatro componentes, los cuales son:

1. El ADN molde, que es un fragmento del ADN del cual se desea obtener copias, es decir amplificarlo.
2. La enzima ADN polimerasa, la cual es capaz de generar una copia del ADN a partir del ADN molde. Se añaden cationes divalentes en forma de cloruro de Magnesio ($MgCl_2$) en forma de co-factores de la polimerasa.
3. Iniciadores de reacción, que son moléculas que son los cebadores o primers de la reacción y los que son encargados de delimitar el fragmento a amplificar.
4. Nucleótidos libres, que son los substratos trifosfatos de los cuatro grupos que conforman el ADN (dATP, dGTP, dCTP y dTTP) y son encargados de crear una cadena complementaria a la cadena molde mediante la incorporación de los mismos (Perez de Castro, A. 2011:3)

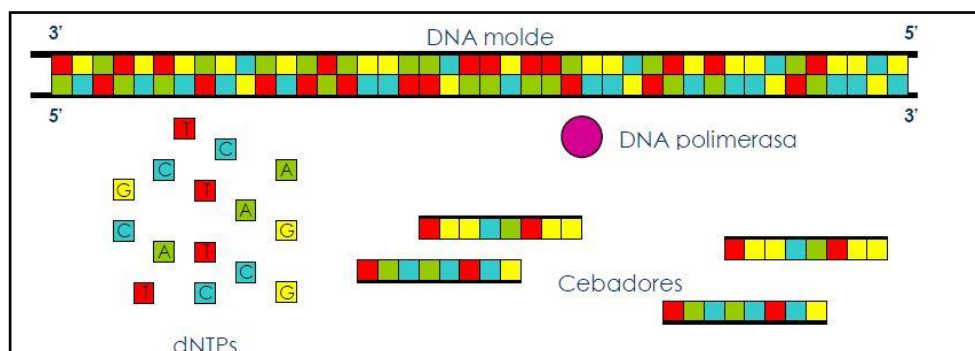


Figura 1.2. Componentes para lograr la PCR (<http://hdl.handle.net/10251/10700>)

Para lograr la replicación es necesario aplicar a la mezcla un ciclo térmico. Este ciclo térmico consiste en la repetición de una serie de cambios de temperatura, donde en cada cambio de temperatura se produce una fase de la reacción total.

- Etapa inicial: de 2 a 10 minutos a 95°C
- Etapa intermedia: Alrededor de 30 ciclos con la siguiente secuencia:
 - Separación del ADN (Melt): 30 segundos a 95°C
 - Anillado (Anneal): 30 segundos a 60°C
 - Alargamiento (Extend): 45 segundos a 72°C
- Etapa Final
 - Alargamiento: de 7 a 10 minutos a 72°C
 - Conservación: 4°C (Conservar a esta temperatura)

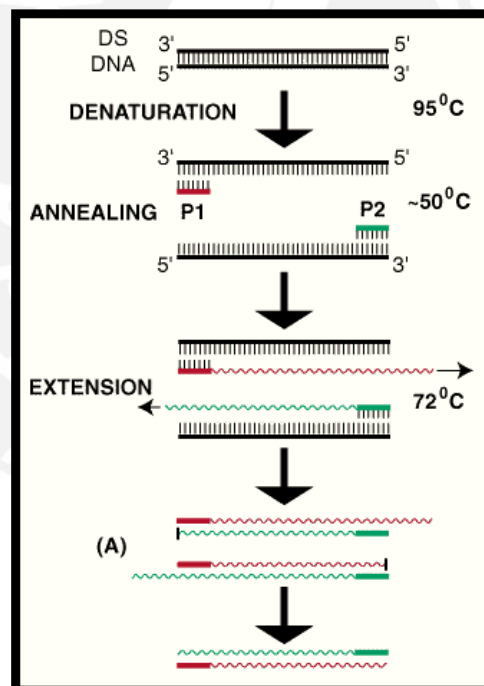


Figura 1.3. Ciclo básico de la PCR

(<http://www.flmnh.ufl.edu/cowries/PCR.gif>)

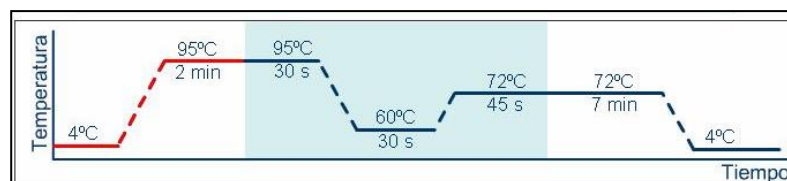


Figura 1.4. Evolución de temperaturas vs. Tiempo para el ciclo de replicación de ADN

Tabla 1.1. Etapas necesarias para el desarrollo del ciclo de replicación de ADN

Etapa	Temperatura (°C)
1	4 - 95
2	95
3	95 - 60
4	60
5	60 - 72
6	72
7	72 - 95
8	72 - 4
9	4

Las figuras 1.3 y 1.4 permiten entender más claramente el proceso. En la figura 1.4, la parte que se encuentra sombreada en celeste es la etapa intermedia, que debe repetirse n veces, es decir, al final de la PCR, la molécula de ADN se habrá replicado 2^n veces, donde n usualmente es igual a 30. Como se puede observar, el ciclo de PCR comienza elevando la temperatura de la muestra hasta los 95°C , donde se produce la separación de las dos hileras de la espiral, luego en la etapa de 60°C , se produce la unión del primer con el segmento específico de ADN que se quiere replicar, y luego a los 72°C , se produce la formación de la nueva cadena. Todo este proceso se repite n veces y finalmente se suele llevar la muestra replicada a aproximadamente 4°C (para colocarla en la congeladora).



Figura 1.5. Mecanismo de la replicación del ADN.

1.4 Termociclador

Un termociclador es una máquina diseñada para aplicar el ciclo térmico de PCR a una o varias muestras de ADN, logrando de esta forma, aumentar la cantidad de la(s) muestra(s), es decir, las replica. El esquema de funcionamiento es presentado en la figura 1.6.

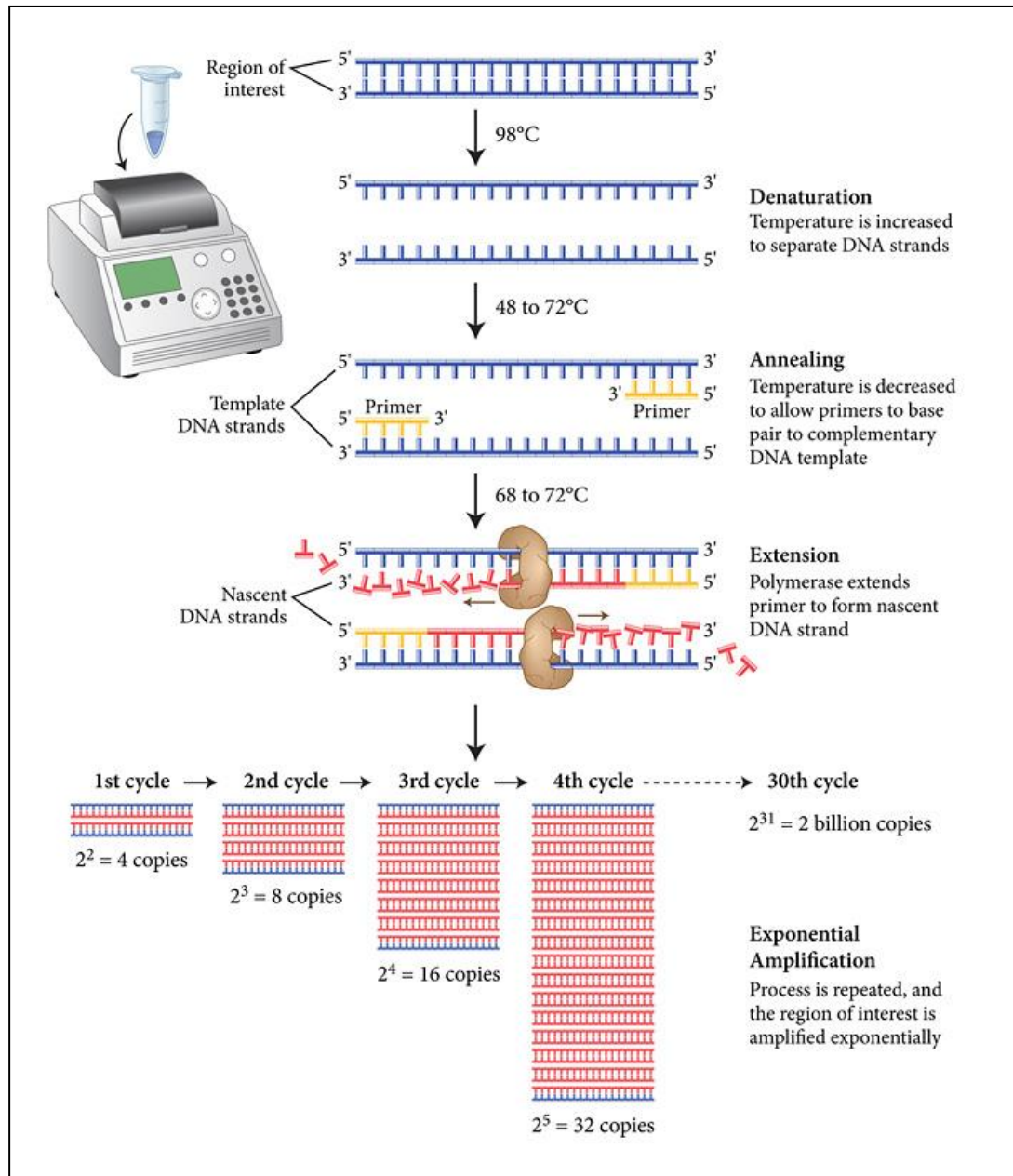


Figura 1.6. Proceso de amplificación de ADN en un termociclador

(<https://www.neb.com/applications/dna-amplification-and-pcr>)

Para la elaboración de este tema de tesis se tendrá en cuenta los conceptos relacionados y desarrollados por la empresa MJ Research, fabricante industrial de termocicladores. El modelo de referencia será el PTC-200, de una estación de trabajo, cabe resaltar que este modelo viene en diferentes capacidades, la primera (60V) de 60 probetas de 0,5 ml y la segunda (96V) de 96 probetas de 0,2 ml.

Este diseño consta de los siguientes componentes, los cuales son mostrados en las figuras 1.7 y 1.8.



Figura 1.7. Componentes del termociclador de la marca MJ Research, modelo PTC-200 (MJ Research 2004)

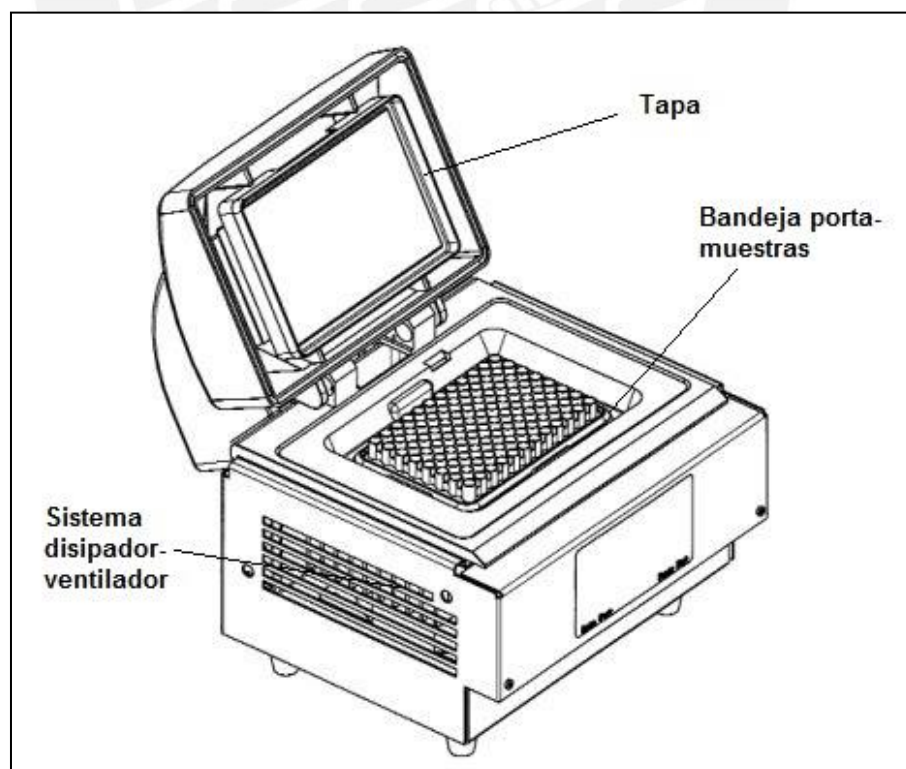


Figura 1.8. Características físicas de la parte termoeléctrica de *The Remote Alpha Dock System* de la marca MJ Research (MJ Research 2004).

1.5 Componentes mecánicos del Termociclador

Para comprender el funcionamiento total de esta máquina se citará una breve descripción de los componentes mecánicos que conforman el sistema termoeléctrico del termociclador del tipo MJ Research y que permiten su funcionamiento:

- Bandeja (placa) portamuestras
- Células (módulos) Peltier
- Disipador
- Ventilador
- Carcasa
- Tapa

1.5.1 Bandeja portamuestras

La bandeja (o placa) portamuestras, es el elemento en el cual se colocan los tubos de reacción, los cuales a su vez, contienen las muestras de ADN. Su función no sólo es la de soportar los tubos de reacción, sino también la de transferir o evacuar el calor uniformemente de las muestras durante las etapas transitorias de la PCR. Existen diferentes formas de bandejas, algunas de fabricación más compleja que otras. Dos de estas formas se muestran en la figura 1.9.

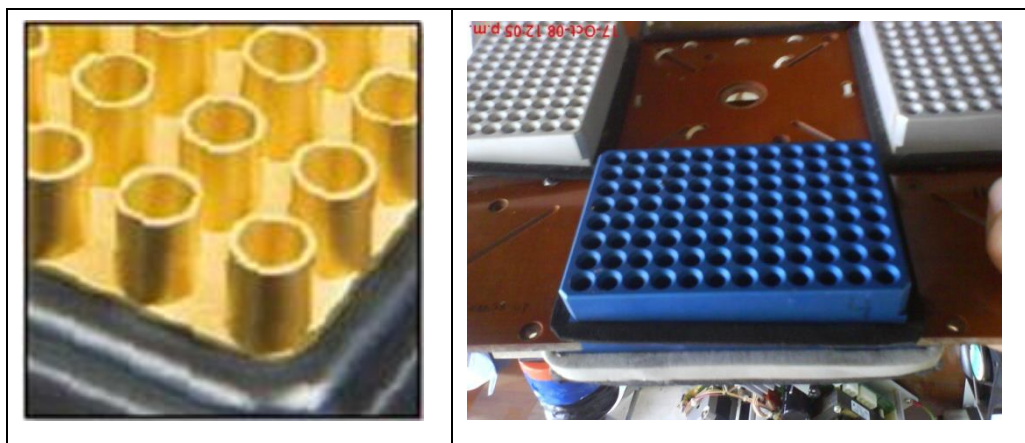


Figura 1.9. Izquierda: Bandeja con agujeros salientes. Derecha: Bandeja con agujeros interiores.

Por otro lado, los materiales de los cuales se fabrican estas bandejas suelen ser de plata chapados en oro o de aleaciones de aluminio. La placa anodizada superficialmente con cristales de corundum (Al_2O_3) posee buena resistencia a la corrosión. Por otro lado, gracias a la alta conductividad de la plata se pueden alcanzar rampas de temperatura cercanas a dos veces las del aluminio, mientras que su chapado en oro brinda protección para la corrosión.

Es necesario ahora mencionar una característica importante en el proceso de PCR que será tomada en cuenta para los cálculos y simulaciones que vendrán más adelante. Durante el proceso de PCR es posible que se produzca condensación de vapor agua en las muestras, lo que puede ocasionar que la reacción no sea adecuada. Para evitar esto, es necesario que la parte superior de los tubos de reacción se encuentren por lo menos a $105^{\circ}C$, esto permitirá evitar la condensación.

1.5.2 Células Peltier

Anteriormente se había mencionado que para lograr el ciclo térmico de PCR, es necesario bajar y subir la temperatura de la bandeja portamuestras una determinada cantidad de ciclos (usualmente son 30). Para lograr esto será necesaria la utilización de células Peltier (también llamadas, módulos Peltier) (figura 1.10), estas permitirán elevar y bajar la temperatura mediante la aplicación de corriente.

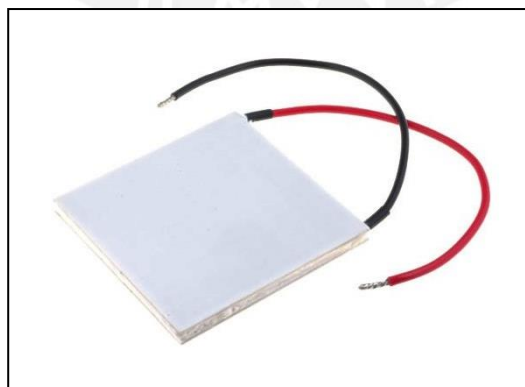


Figura 1.10. Célula Peltier.

El funcionamiento de las Células Peltier está basado en la aplicación de los conceptos de termoelectricidad, los cuales abarcan cuatro principios:

1. Efecto Seebeck.
2. Efecto Peltier.
3. Efecto Thomson.
4. Efecto Joule.

La composición de una célula Peltier, se muestra en la figura 1.11.

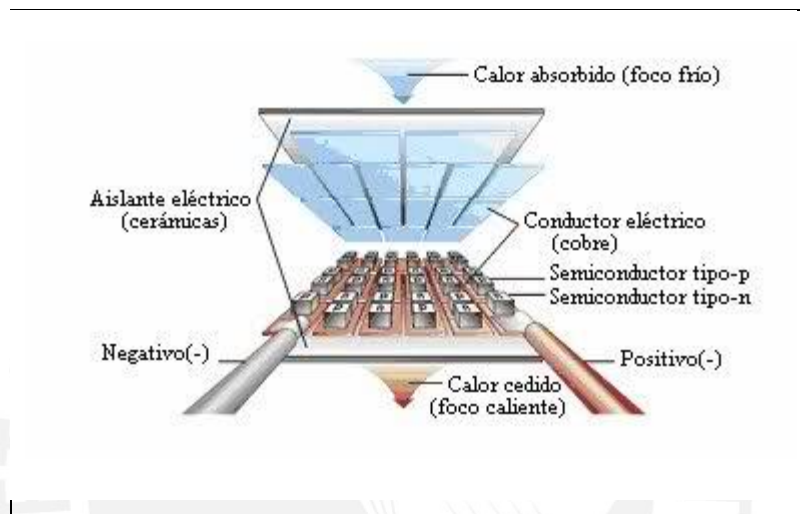


Figura 1.11. Esquema de componentes de una célula Peltier.

El efecto Seebeck establece que “la aplicación de una diferencia de temperaturas en las uniones de dos materiales distintos ocasiona una diferencia de potencial”, el efecto Peltier es lo contrario del efecto Seebeck, este “consiste en hacer pasar una corriente procedente de una fuente de energía eléctrica continua, a través de un circuito formado por dos conductores distintos, obteniéndose que una de sus uniones absorbe calor y la otra lo cede”. Por otro lado, el efecto Thomson está referido a un solo material: “Si existe tanto una corriente como un gradiente de temperaturas, se puede generar o absorber calor en cada segmento de un cable considerado individualmente”, por su parte el efecto Joule establece que “cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor, se genera calor debido al choque de los electrones con la red atómica”. Cada uno de estos principios, en mayor o menor proporción, tienen participación en el funcionamiento de una célula Peltier, básicamente se consideran con mayor importancia los Efectos Joule y Peltier. En la figura 1.12, tomada del libro *Thermoelectricity: science and engineering* de Heikes, Robert R., se puede apreciar esquemáticamente el

principio Seebeck y Peltier, donde se establece T_h como la temperatura de la cara caliente, y T_c como la temperatura de la cara fría.

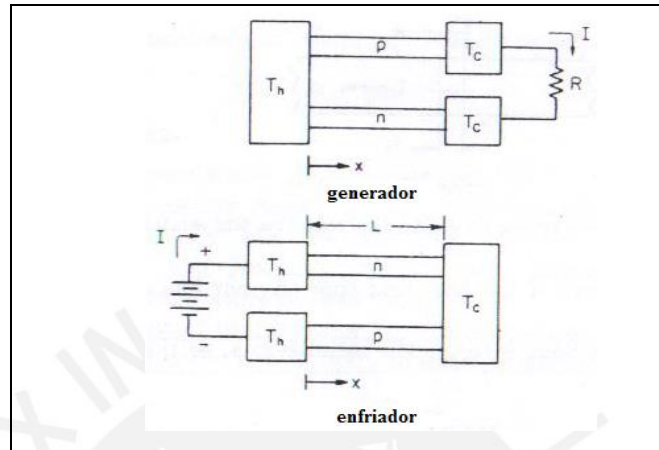


Figura 1.12. Dibujo esquemático del funcionamiento del efecto termoeléctrico de Seebeck, como generador, y del efecto Peltier como enfriador (Heikes, R. 1961)

Finalmente, una célula Peltier consiste en la unión de dos materiales semiconductores, uno tipo p (huecos libres) y otro tipo n (electrones libres), estos están unidos en serie a través de una soldadura con un material conductor cuyo poder termoeléctrico se considera nulo. La unión de los materiales es una placa de cerámico. Según esto, si en el lado del material N se aplica la polaridad positiva de alimentación y en el lado del material P la polaridad negativa, la placa de cerámico de la parte superior enfría, mientras que la inferior calienta (Heikes, R. 1961). De la misma forma, pero si ahora se invierte la polaridad, es decir, si se hace circular la corriente en sentido contrario, lo que se logrará es que la parte superior se caliente y la inferior se enfríe. Es decir, lo que se consigue finalmente es que la célula Peltier actúe como una bomba de calor, donde este último se absorbe en la cara fría T_c , luego es llevado por la corriente que circula a través del Peltier, y se evacua en el lado caliente T_h (MacDonald, D. 1962).

Con la conexión de estas uniones en serie se obtiene la forma mostrada en la figura 1.10, las uniones en serie se realizan formando un cuadrado, con lo que se obtiene finalmente la célula Peltier mostrada en la figura 1.9.

Para la realización de este trabajo de tesis se cuenta con un ejemplar de célula peltier.

1.5.3 Sistema Disipador-Ventilador

Si bien al inicio se consideraron al disipador y el ventilador como componentes separados, en realidad la función de cada uno se entiende mejor cuando se les toma en conjunto. La configuración que se observa en la figura 1.13 muestra en primer lugar la bandeja portamuestras, esta tendría que ser de un material con alta conductividad térmica para permitir cambios rápidos de temperatura, como se dijo anteriormente, este material será plata. Debajo de la bandeja se encontrarían las Células Peltier necesarias para lograr los cambios de temperatura. Luego, como también se evacuará calor, la elección de un disipador adecuado es primordial para el correcto funcionamiento del sistema, además, debido a que la convección natural no será suficiente, la selección de un ventilador para ayudar a evacuar el calor por convección forzada también debe realizarse; ya que si se logra obtener bajas temperaturas en el lado caliente, también se logrará menores temperaturas en el lado frío, y de esta forma se absorberá más calor del lado que se requiere enfriar.

Para lograr evacuar la mayor cantidad de calor, se debe procurar una adecuada convección forzada, es por eso que se deberá seleccionar un ventilador que asegure el flujo volumétrico de aire necesario para disipar el calor satisfactoriamente (Piminchumo, 2009:34).

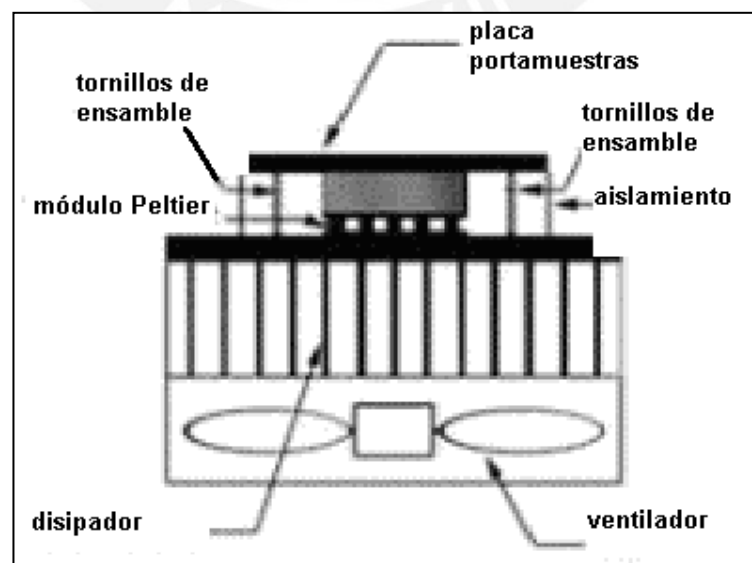


Figura 1.13. Configuración del sistema termoelectrico del Termociclador.

1.5.4 Carcasa

La carcasa, es el componente que albergará a los componentes mecánicos mencionados anteriormente.

Como ya se ha mencionado, este componente ha sido diseñado previamente, basado en modelos de fabricantes industriales de termocicladores. Para el modelo adoptado se han tomado en cuenta el ensamble de los componentes mencionados previamente.

1.5.5 Tapa

La tapa es el elemento que cubrirá la bandeja portamuestras, y por ende, también las muestras. Este elemento debe contar con dos funciones primordiales: La primera de mantener a 105°C la parte superior de los tubos de reacción para evitar los condensados y la segunda de ejercer presión sobre los mismos.

1.6 Antecedentes del proyecto

Para este proyecto, se desarrolló un prototipo del módulo termo-mecánico del termociclador. Este prototipo cuenta con una bandeja portamuestras y la célula peltier, que serán reutilizados para este proyecto de tesis. A continuación se describen las características de los componentes previamente utilizados:



Figura 1.14. Prototipo elaborado

1.6.1 Bandeja portamuestras

Se trabajará con una bandeja con agujeros interiores, es decir, similar a la de la imagen derecha de la figura 1.9, debido a que es más simple y se cuenta con un ejemplar de esta. Por otro lado, la placa tendrá 48 agujeros y además el material será plata pura.

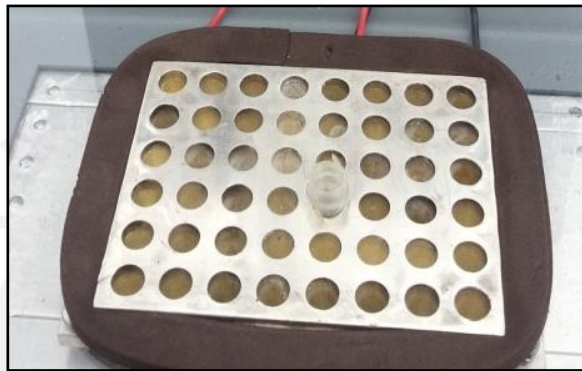


Figura 1.15. Bandeja con agujeros interiores utilizada.

1.6.2 Célula Peltier

Se cuenta con unidades de estas y eventualmente se evaluará la compra de nuevas unidades con propósito de pruebas. La célula Peltier es un modelo de la empresa TE Technolog, categoría High Temperature: VT-199-1.4-0.8.

Este modelo presenta una capacidad de calor absorbido máximo de 172 W, se encuentra siempre en stock en la empresa y su temperatura máxima de operación es 200°C.

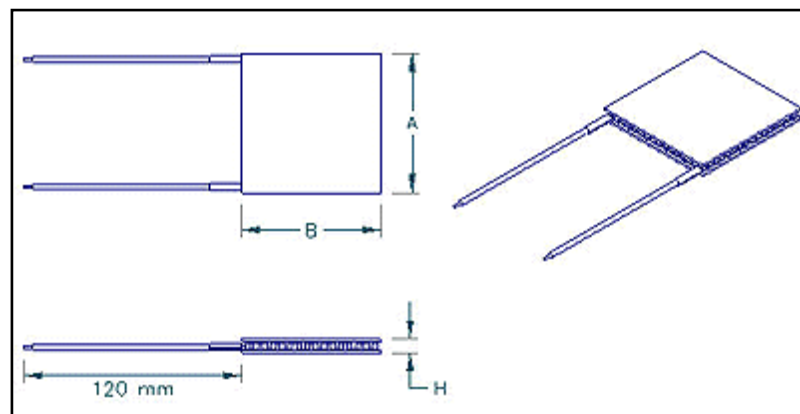


Figura 1.16. Geometría de la célula Peltier seleccionada

1.6.3 Sistema disipador-ventilador

Previamente se seleccionó un disipador de la empresa Pada Engineering, tipo extruded, código 8586, cuyas características físicas se muestra en la figura 1.17.

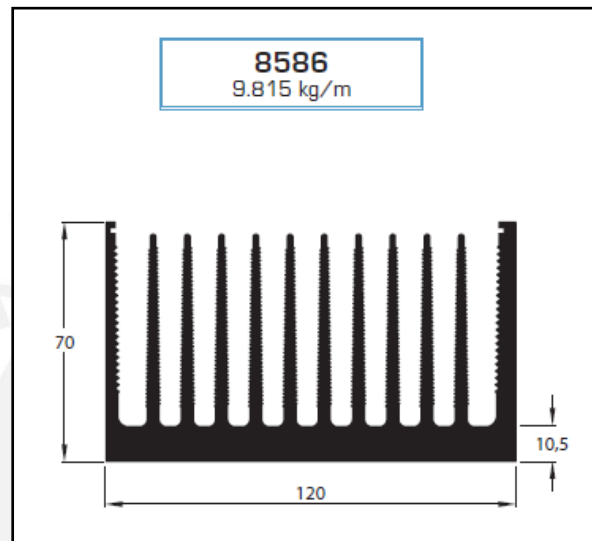


Figura 1.17. Geometría del disipador seleccionado

El ventilador seleccionado previamente fue adquirido como repuesto para computadoras. Se muestra físicamente en la figura 1.18.



Figura 1.18. Ventilador seleccionado para primer prototipo.

1.6.4 Carcasa

Como se puede apreciar en la figura 1.19., este modelo posee salidas de aire a los costados del equipo, y las patas en la parte inferior que permiten el ingreso de aire al ventilador.



Figura 1.19. Carcasa de prototipo de termociclador

1.6.5 Tapa

En la figura 1.20. se puede apreciar la tapa fabricada en los anteriores prototipos.

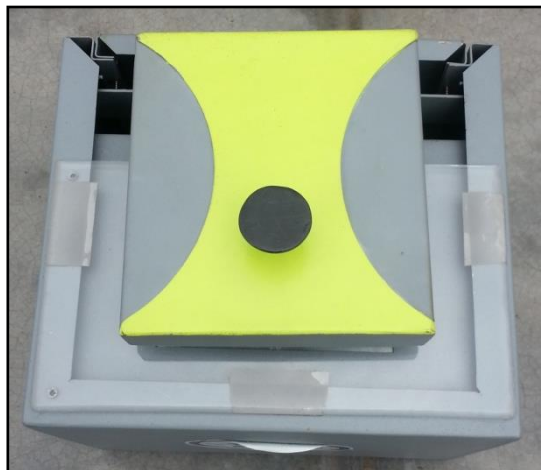


Figura 1.20. Tapa de prototipo de termociclador

Esta tapa cuenta con una plancha interior, que es la encargada de evitar la condensación de agua en las muestras y de ejercer presión sobre los tubos de reacción. En la figura 1.21, pueden apreciarse los detalles del interior de la plancha superior.

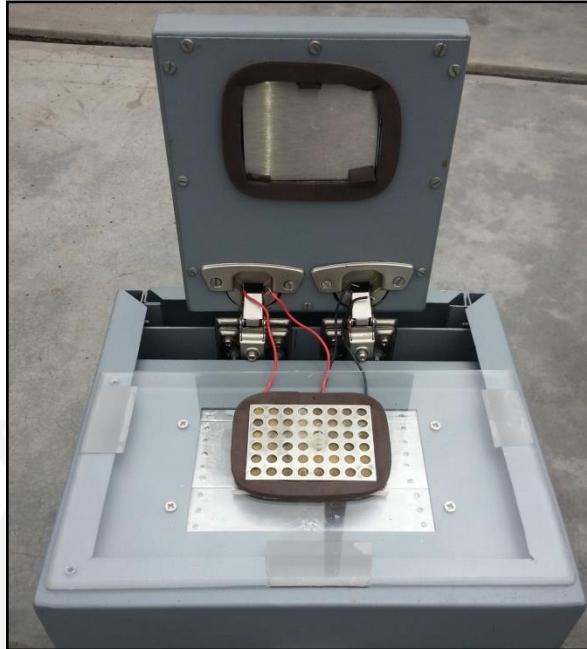


Figura 1.21. Plancha interior de tapa de prototipo

1.7 Métodos analíticos a utilizar para el diseño

En esta sección se presentarán las herramientas matemáticas con las cuales se estudiarán y permitirán analizar el comportamiento del sistema termo-mecánico, llegando a un diseño aproximado de los componentes a mejorar en este tema de tesis. Seguidamente se realizará la simulación haciendo uso de la computadora.

Este diseño debe estar regido por la Primera Ley de la Termodinámica, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$Q = \Delta U + W \quad (1.1)$$

donde Q es el calor, W es el trabajo y ΔU es la variación de la energía interna.

Esta ecuación será muy útil para aproximar los valores de calor que deben ser cedidos y absorbidos de la placa, y además realizar la comprobación del trabajo eléctrico necesario para llevar a cabo el proceso, con lo cual se conocerán los parámetros eléctricos de la célula Peltier, para su respectiva validación.

Para los cálculos de diseño se utilizarán las ecuaciones de transferencia de calor que son realizadas mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Estos tres mecanismos están expresados mediante las siguientes leyes estudiadas:

$$\bullet \quad q(W/m^2) = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

$$\bullet \quad q(W/m^2) = h(T_s - T_\infty) \quad (1.3)$$

$$\bullet \quad E_b(W/m^2) = \sigma T_s^4 \quad (1.4)$$

Los dos principios más utilizados en este tema de tesis serán los de conducción y convección, mientras que el de radiación se aplicará solo cuando se considere apreciable. Por ejemplo la Ley de Fourier, la cual denota el mecanismo de conducción podrá ser utilizada en el cálculo de la bandeja portamuestras, el disipador y otros elementos que estén sujetos a la conducción de calor en el proceso. La Ley de enfriamiento de Newton, la cual denota el mecanismo de convección, será utilizada en el disipador.

Como se dijo inicialmente, la disipación de calor deberá ser necesariamente por convección forzada. Por lo que para poder hallar el flujo de aire necesario para disipar una cantidad de calor específica, se debe hallar primero el coeficiente convectivo, el cual cumple la siguiente relación general:

$$\frac{hl}{k} = Nu = \frac{f}{2} Re Pr \quad (1.5)$$

donde, h es el coeficiente convectivo, k es la conductividad térmica del fluido, l es una longitud característica, Nu es el *Número de Nusselt*, Pr es el *Número de Prandtl*, Re es el *Número de Reynolds* y f es el *Coficiente de Fanning*. Hay otras relaciones empíricas que se han ido desarrollando para aplicaciones específicas, y que por ende, resultan más exactas en ciertas situaciones y disposiciones, la elección de alguna de ellas se hará en el transcurso del desarrollo de los cálculos.

Como se aprecia en la ecuación 1.5, el coeficiente convectivo es función del Número de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1.6)$$

donde ρ es la densidad, v es la velocidad y μ la viscosidad del fluido circundante (en este caso sería aire), además, l es una longitud característica de la geometría analizada. Es decir, con la velocidad del aire se puede hallar el coeficiente convectivo, y por consiguiente, la cantidad de calor evacuado por el disipador. Para esto último, el cálculo de la transferencia de calor se debe realizar tomando en cuenta la geometría aleteada del disipador, tal y como se muestra en la figura 1.17 [10].

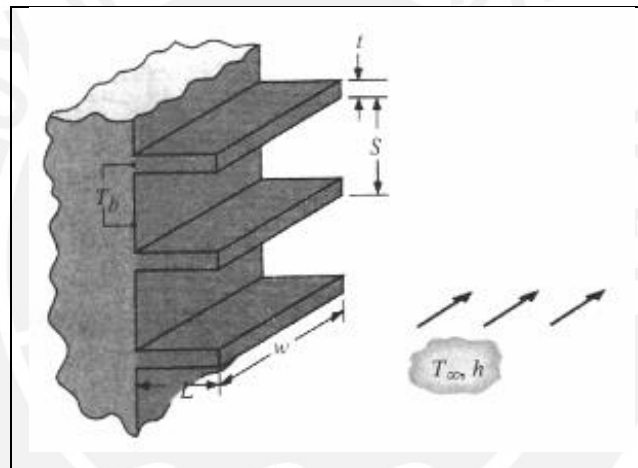


Figura 1.22. Superficie aleteada.

La expresión 1.7 permite calcular el valor del calor evacuado del disipador al aire circundante, o sea, el calor que el aire absorbe del disipador.

$$Q = \frac{T_s - T_\infty}{\frac{\Delta x}{Ak} + \frac{1}{A_t n_t h_\infty}} \quad (1.7)$$

En este caso el subíndice s está referido a la temperatura en la superficie de la plancha base del disipador, es decir, la superficie que estará en contacto con los Peltier, y el subíndice ∞ , está referido a la temperatura del aire circundante. Por otro lado, el primer término del denominador es la resistencia térmica por conductividad de la plancha base del disipador, y el otro término es la resistencia térmica de la parte aleteada, para la cual

$$A_t = NA_f + A_b \quad (1.8)$$

donde: A_t : área total de transferencia de calor
 N : número de aletas
 A_f : área de una aleta
 A_b : área de la base no aleteada

también

$$n_t = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - n_f) \quad (1.9)$$

donde: n_t : eficiencia total del conjunto de aletas
 n_f : eficiencia de una aleta

La eficiencia de la aleta se obtiene de

$$n_f = \frac{\tanh m(L/2)}{m(L/2)} \quad (1.10)$$

En este caso L es la longitud de la aleta y m es una coeficiente que se obtiene de las características propias de la aleta y esta expresado por

$$m = \left(\frac{hP}{kA_c} \right)^{1/2} \quad (1.11)$$

donde: A_c : Sección de la aleta
 P : Perímetro de la aleta
 h : coeficiente convectivo
 k : conductividad térmica

Luego, para resolver el problema de análisis transitorio existe un método simple, conocido como El Método de Resistencia Térmica Interna Despreciable, en el cual se establece que la temperatura del sólido es esencialmente uniforme en todo su volumen en cualquier instante del proceso transitorio. Para que la temperatura sea uniforme en todo el proceso, el gradiente de temperatura debe ser nulo, lo que tendría que implicar que la conductividad térmica del material debería ser infinita. Esto no se cumple en la realidad, aunque se puede aproximar mucho a esta condición si la resistencia de conducción del sólido es mucho menor que la resistencia de conducción entre sólido y sus alrededores (por ejemplo el coeficiente convectivo de un fluido circundante) [10].

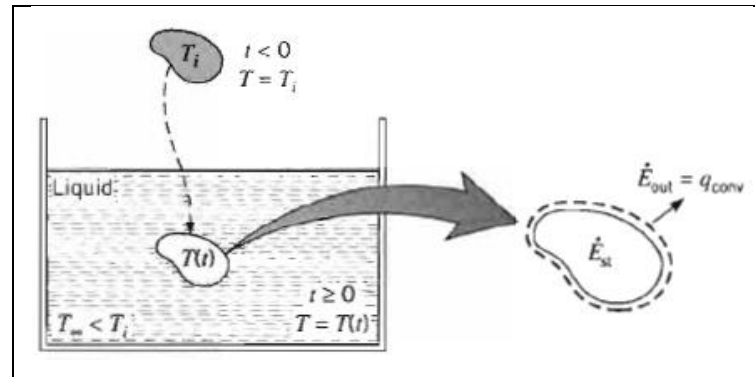


Figura 1.23. Enfriamiento de una pieza.

A continuación se hará una breve resolución del método. En la figura 1.23 [10], se muestra el enfriamiento de un pieza de acero en un recipiente con agua, según esto, la Primera Ley de la Termodinámica quedaría

$$-\dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \tag{1.12}$$

luego

$$-Q_{evac} = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \tag{1.13}$$

integrando

$$Q_{evac}(\Delta t) = \rho V C_p (\Delta T) \tag{1.14}$$

donde Q_{evac} representa el calor evacuado de la pieza, lo que sería equivalente al calor evacuado de la bandeja por el Peltier, luego, nuevamente ρ es la densidad y C_p es la capacidad calorífica del material de la pieza, V es el volumen de la pieza, y finalmente ΔT es la variación de temperatura obtenida desde el inicio hasta el final del proceso. Por otro lado, debe aclararse que para que pueda aplicarse este método de forma que brinde resultados confiables, debe cumplirse la siguiente condición:

$$Bi = \frac{h L_c}{k} \leq 0.1 \tag{1.15}$$

donde:

Bi: Número de Biot

Lc: Longitud característica (volumen del sólido/superficie de transmisión)

h: coeficiente convectivo

k : conductividad térmica

Este método tiene un error de aproximadamente 5% [10,22], lo cual asegura el obtener resultados confiables. Por otro lado, si bien la situación anterior se refiere al caso en el que la evacuación de calor es por convección a un fluido circundante, también se puede utilizar para analizar la bandeja, asumiendo un coeficiente convectivo aparente generado por el Peltier, esto se verá más adelante cuando se avance en los cálculos. Una deducción más exhaustiva de este método se muestra en el anexo 2, donde se han tomado en cuenta el coeficiente convectivo del fluido y la temperatura superficial de la pieza.

1.8 Métodos numéricos a utilizar para el diseño

A continuación se presentarán los métodos numéricos utilizados en la definición del diseño mejorado del Termociclador.

Trataremos en este tema de introducir lo más clara y brevemente posible nuevas herramientas que utilizaremos para la resolución de los casos mencionados en el planteamiento de los objetivos del proyecto, que se identifican con cada uno de los tipos de inestabilidad presentados en el tema anterior.

En concreto se establecerán y desarrollarán las bases sobre las que se sustenta el Método de los Elementos Finitos (MEF), así como los aspectos fundamentales del software comercial ANSYS en lo que respecta al tratamiento de los problemas de inestabilidad; relacionándose ambos bloques debido a que el MEF es el método de cálculo empleado en la resolución de problemas modelados mediante ANSYS.

1.8.1 Dinámica de Fluidos Computacional

La dinámica de fluidos es una rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos en relación a las fuerzas que actúan sobre ellos. Pero la Dinámica de Fluidos Computacional, o en breve CFD por sus siglas en inglés, es la utilización de las computadoras como herramientas para resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos con el fin de poder aplicarlas a problemas reales y de utilidad práctica.

Así pues, hay tres niveles de estudio en la dinámica de fluidos computacional:

Por un lado están los aspectos fundamentales que resultan en un conjunto de ecuaciones generalmente bastante complicadas que nos describen lo que físicamente ocurre en determinada situación. Puede decirse que este aspecto pertenece enteramente a la dinámica de fluidos como rama de la ciencia.

Después está el problema de resolver esas ecuaciones usando la computadora. Aquí intervienen conceptos de otras disciplinas como el análisis numérico, desarrollo de software, visualización de imágenes, etc.

Finalmente, está el aspecto práctico, en el que el usuario generalmente usa el software creado como resultado de los dos puntos anteriores y lo aplica a problemas reales. En este caso, siempre existe la necesidad de verificar los resultados numéricos con resultados medidos cuidadosamente en un sistema de prueba. Esto es lo que se conoce como validación.

1.8.2 Método de volúmenes finitos

El método de los volúmenes finitos es una herramienta ampliamente utilizada en el campo de aplicación de las simulaciones térmicas.

Mediante este método se permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Es un método alternativo a los de diferencias finitas y elementos finitos.

Con la consideración de que una malla de discretización del espacio fluido, en cada punto de esta malla se construye un volumen de control que no se traslapa con los puntos vecinos. De esta forma el volumen total del fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual entrega como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. Para realizar la integración se requiere especificar perfiles de variación de la variable dependiente entre los puntos de la malla, de modo de poder evaluar las integrales resultantes. La principal propiedad del sistema de ecuaciones discretizadas resultante, es que la solución obtenida satisface en forma exacta las ecuaciones de conservación consideradas, independientemente del tamaño de la malla.

Las ecuaciones de conservación de masa (1.16), momento (1.17) y un escalar pasivo (1.18) son expresadas en coordenadas cartesianas:

$$\dots - (\rho \dots) \tag{1.16}$$

$$-(\rho \dots) - (\rho \dots) - \dots - \left(\mu \left(\dots \dots \right) \right) \tag{1.17}$$

$$-(\rho \emptyset) - (\rho \emptyset) - \left(r \left(\dots \right) \right) \tag{1.18}$$

Estas ecuaciones se integran en cada volumen de control creado y se aplica el teorema de divergencia de Gauss para convertir integrales de volumen que involucran operadores de divergencia y gradientes en integrales de superficie. Si los volúmenes de control no se deforman con el tiempo, entonces las derivadas temporales se pueden mover fuera de las integrales de volumen y se convierten en las siguientes ecuaciones:

$$-\int \dots \int \dots \tag{1.19}$$

$$-\int \dots \int \dots \tag{1.20}$$

$$\int \dots \int \left[\dots \dots \right] d \dots \int$$

$$-\int \dots \int \dots \int \left[\dots \right] d \dots \int \tag{1.21}$$

Donde V y S indican respectivamente el volumen y las regiones superficiales de la integración, y dn_j son las componentes cartesianas diferenciales del vector normal con la superficie exterior. Las integrales de volumen representan la suma de los flujos. Los cambios en estas ecuaciones necesitan alguna generalización para dar cuenta de la deformación de la malla.

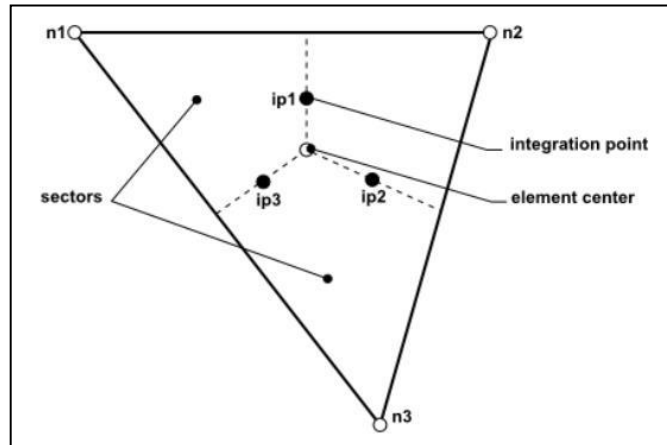


Figura 1.24. Elemento de la malla [11]

1.8.3 Descripción del modelado en Dinámica de Fluidos Computacional en el software ANSYS V15.0

Para realizar las simulaciones correspondientes, se necesita interactuar con la interface del software ANSYS, en el módulo de CFX, el cual es el indicado para las simulaciones del tipo CFD.

El proceso típico de realización de un cálculo está dado en tres etapas: Pre-procesamiento, solución y post-procesamiento.

Estas etapas son trabajadas en la plataforma ANSYS Workbench, en la cual se trabajan los proyectos con una visión esquemática, pudiendo importar la geometría y/o mallado de otro software.

La interface de esta plataforma, nos permite pinchar y arrastrar todos los módulos necesarios para nuestro proyecto. Para esta tesis se trabajo con el módulo de la figura 1.24.

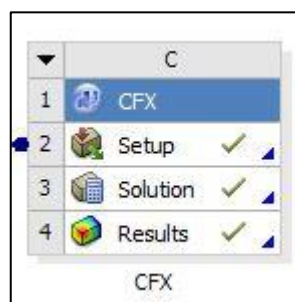


Figura 1.24. Interface del módulo CFX del software ANSYS V15.0

A continuación, se dará una breve descripción de lo que comprende cada etapa descrito en el módulo anterior.

1.8.3.1 Pre-procesamiento (Setup)

En esta etapa se establece el modelo mediante la creación de la geometría o CAD para la posterior elaboración de la malla sobre las superficies o cuerpos de interés.

La generación de la malla se realiza mediante una aproximación discreta del problema en base a puntos o nodos.

Para todas las simulaciones realizadas a los sub-sistemas fueron seleccionadas mallas del tipo tetraédricas, dado que nos daban una mayor calidad de mallado.

En esta etapa también debe definirse los materiales de cada cuerpo, con sus respectivas constantes, para conocer el comportamiento de cada uno.

1.8.3.2 Solución

La solución está dada cuando se conocen todos los valores de los caracteres del problema a simular.

Para que la solución pueda ejecutarse, es necesario aplicar las condiciones de borde en los nodos y elementos.

Para todas las simulaciones de los sub-sistemas es importante realizar enfoques iterativos para aproximarse a la solución exacta.

El proceso de solución no requiere la interacción del usuario, y suele llevarse a cabo como un proceso por lotes.

1.8.3.3 Post-procesamiento

Es la última etapa en la cual se obtiene información cuantitativa y/o cualitativa sobre el desempeño de flujo de fluido del sistema.

Se visualizaron los resultados, dependiendo de la variable que deseamos conocer, en este caso se apreció el efecto del calor aplicado sobre una superficie.

Cabe resaltar que en esta interface es muy versátil para trabajarla, dado que se tiene dos características muy importantes. La primera es que se puede definir cuantas variables sean necesarias para el usuario, y la congelación de variables, característica que nos ayuda a comparar los resultados obtenidos con otros archivos.

Para conocer los resultados de una variable, es necesario definir una ubicación en la interface.



CAPÍTULO 2

MEJORA DEL DISEÑO DEL MÓDULO TERMO-MECÁNICO DEL TERMOCICLADOR

2.1 Introducción

En el presente capítulo, se realizarán los cálculos para la validación de los componentes previamente seleccionados en el diseño del prototipo, además de los cálculos para los componentes no estudiados a detalle, es decir la tapa y la carcasa del sistema.

Mediante la validación, se identificará si es que existen mejoras a realizar en los componentes previamente definidos, además de las mejoras en los componentes no estudiados a detalle, con el fin de mejorar el funcionamiento del sistema termo-mecánico completo.

El módulo termo-mecánico deberá ser analizado mediante cálculos analíticos en el ámbito de transferencia de calor, dada la naturaleza del sistema. El sistema deberá enfriar o calentar las muestras mediante una adecuada transferencia de calor para que el proceso sea realizado eficientemente.

Una vez obtenidos todos los parámetros para el nuevo diseño planteado, se tomará este como punto de partida para la simulación mediante el uso de herramientas computacionales, lo cual servirá para validar finalmente al sistema.

2.2 Revisión de cálculos de componentes diseñados y seleccionados del sistema

2.2.1 Bandeja Portamuestras

Tal como se ha mencionado en el capítulo anterior, se cuenta con una bandeja portamuestras ya fabricada. Esta bandeja fue fabricada, basada en un estudio previo mediante el método de elementos finitos, el cual arrojó los resultados de la geometría de la bandeja [5], además la geometría que tienen los agujeros para las muestras fue basado en un prototipo físico de una placa para 96 muestras de 0.2 ml.

Cabe resaltar que el diseño planteado, no es igual al modelo actual que se tiene de la bandeja, la cual se muestra en la figura 2.1.

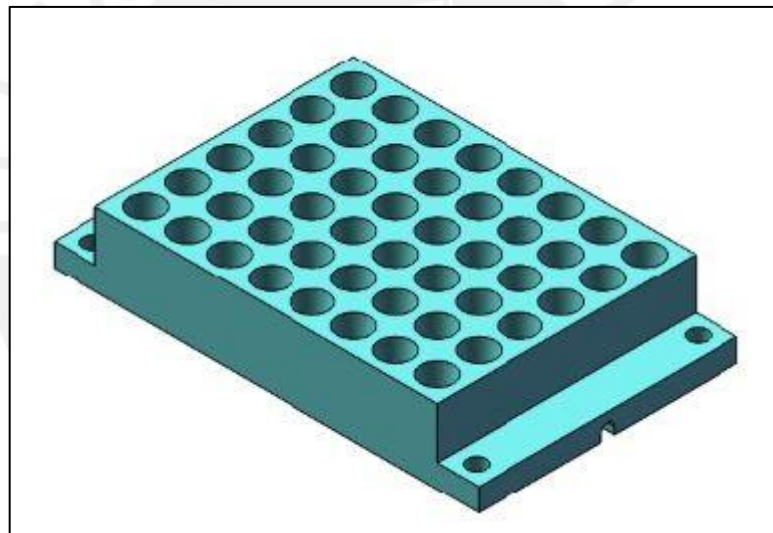


Figura 2.1. Modelo en 3D de la bandeja portamuestras actual

La bandeja es de plata pura debido a su alta conductividad térmica, así como su buena resistencia a la corrosión y que no produce polución en las muestras, lo cual es recomendado para el uso de equipos de laboratorio.

Se realizarán los cálculos correspondientes para validar si el diseño actual de la bandeja permite el funcionamiento correcto del sistema.

Las características físicas que tiene la bandeja portamuestras, son las siguientes:

Tabla 2.1. Características de la bandeja portamuestras

Dimensiones generales	
Largo	92.00 mm
Alto	15.00 mm
Ancho	56.00 mm
Agujeros	48 (6x8)
Material	
Denominación	Plata pura (99%)
Densidad	11000 kg/m ³
Conductividad térmica	420 W/mK
Capacidad calorífica	230 J/kg K
Peso	553.09 gr.

El procedimiento para llevar a cabo la reacción en cadena polimerasa será descrito a continuación [3]:

Primer paso: Tomar 50-100 ng de ADN (1-10 ng de plasma de ADN) en un tubo de reacción esterilizado de pared delgada de 200 μ L.

Segundo paso: Agregar los siguientes componentes

- 5.0 μ L de 10x cloned Pfu reaction buffer.
- 0.4 μ L de 25 mM dNTPs.
- 1.0 μ L de primer #1 (100 ng/ μ L).
- 1.0 μ L de primer #2 (100 ng/ μ L).
- 1.0 μ L Pfu Turbo DNA Polymerase (2.5 U/ μ L).
- Agua estéril hasta un volumen final de 50 μ L.

2.2.1.1 Comportamiento térmico de la muestra

En el procedimiento establecido se identifica que la probeta debe llenarse hasta un volumen final de 50 μ L, no obstante se ha identificado en la bibliografía que se usan probetas de hasta 100 μ L [6], por lo que será tomado como condición para los cálculos.

El comportamiento de la muestra será tomado como las propiedades termo físicas del agua, dado al alto porcentaje de agua que contiene esta (83.2% de agua).

La temperatura se establecerá de acuerdo al promedio de temperaturas de operación de las muestras. El rango de operación encuentra la máxima temperatura en 95°C y la mínima en 60°C, por lo tanto el promedio será de 77.5°C.

Las propiedades termo físicas para el agua a 77.5°C son:

Tabla 2.2. Propiedades a 350.5 K [7]

Propiedades del agua a 77.5°C	
Densidad	
Calor específico	
Viscosidad dinámica	
Conductividad térmica	
Número de Prandtl	
Número de Biot	

Para que el proceso sea realizado correctamente, se debe cumplir que la bandeja y las muestras eleven y disminuyan su temperatura de forma casi simultánea. Esta condición podría cumplirse debido a que la masa de las muestras es mucho menor que el de la bandeja, además para que ocurra esto, la capacidad calorífica de las muestras debe ser menor que la de la bandeja, con lo cual se establece la siguiente relación para ambas:

$$(mxC_p)_{muestras} < (mxC_p)$$

Sin embargo, este no es el único supuesto para el comportamiento de las muestras, dado que la bandeja portamuestras posee una alta conductividad térmica respecto a la de las muestras (≈ 630 veces mayor), entonces la bandeja llegaría a la temperatura final mucho antes que ellas.

Resumiendo, se tienen dos propuestas para el comportamiento térmico de las muestras:

1. La bandeja portamuestras y las muestras alcanzan las temperaturas casi simultáneamente.
2. La bandeja portamuestras alcanza la temperatura final mucho antes que las muestras.

Para comprobar cuál de los supuestos es el correcto, debemos analizar el fenómeno de convección libre en estado transitorio que se da en ambos casos, dada la naturaleza del sistema.

Se aprecia en la figura 2.2. cómo será el fenómeno para este sistema.

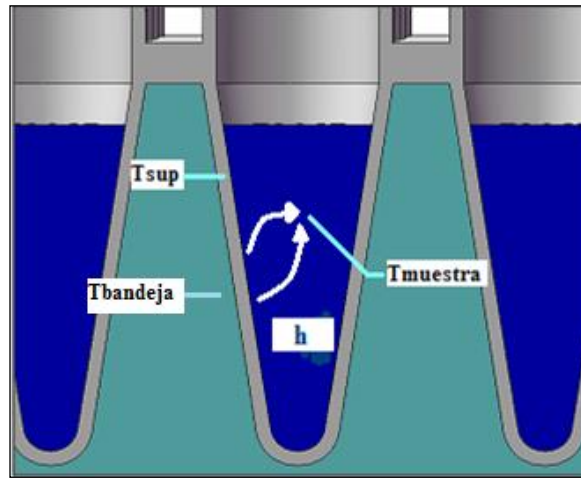


Figura 2.2. Efecto de la convección natural en el calentamiento de la muestra [5]

Entonces, el coeficiente convectivo natural para una pared plana (caso del cono), está dado por la siguiente relación [7]:

$$h = \begin{cases} 0 & \text{if } Gr \leq 1 \\ \frac{C_1 (Gr Pr)^{1/4}}{[1 + (C_2 / Pr)^4]^{1/4}} & \text{if } Gr > 1 \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde

$$Gr = \frac{g \beta (T_{sup} - T_{bandeja}) L^3}{\nu^2} \quad (2.2)$$

Dado que las placas inclinadas, el valor de la gravedad será de la componente vertical $g \cdot \cos(\theta)$, donde θ es el ángulo del plano inclinado, en este caso es el semiángulo del cono, según la siguiente geometría (14.2°):

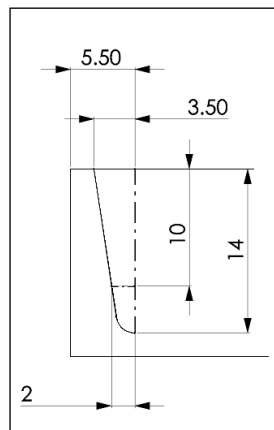


Figura 2.3. Geometría de los agujeros de la bandeja portamuestras

Además, la difusividad térmica también puede ser expresada por:

$$\text{---} \tag{2.3}$$

Además, considerando que el tubo de reacción de plástico presenta una resistencia térmica muy pequeña (esto ya que sus paredes son muy delgadas y permiten una transferencia de calor más eficiente [5,4]), se puede asumir que la temperatura de contacto entre las superficies de la bandeja y el tubo, y entre el tubo y la muestra, es la misma. Ahora, como el caso 1 implica una diferencia de temperatura pequeña entre la superficie y la muestra, se asumirá que esta es 1°C ($T_s - T_\infty$), así, reemplazando los parámetros en la ecuación 2.3 se tiene que:

$$\frac{(973.8 \text{ ---}) (4195 \text{ ---})}{\text{---}}$$

Además, reemplazando en la ecuación 2.2.

$$\frac{(9 \text{ ---} x \cos(14.2^\circ) \text{ ---}) (624 \text{ ---}) (1 \text{ ---} C) (0 \text{ ---} m)}{(1.62 \times 10^{-7}) (3.74 \times 10^{-7} \text{ m}^2/s)}$$

Llevando este resultado a la ecuación 2.1, para hallar el coeficiente de convección:

$$\frac{h(0 \text{ ---} m)}{\text{---}} \left\{ 0 \quad \frac{387(\text{ ---})}{[1 \text{ ---} (0 \text{ ---} 29) \text{ ---}]]} \right\}$$

Finalmente para comprobar si se puede utilizar el Método de Resistencia Térmica Interna Despreciable a la muestra, es decir que la temperatura de estas muestras varía de forma uniforme en todo su volumen durante las etapas transitorias, se dispone de una condición [7]:

1, donde Bi es el número de Biot y está dado por:

$$\text{---} \tag{2.4}$$

Donde $L_{característica}$ es la longitud que se obtiene dividiendo el volumen del elemento entre la superficie de transmisión de calor [7], para el caso del cono sería

$$L_{característica} = \frac{\left(\frac{1}{3}(\pi r^2)h\right)}{\pi r g} \quad (2.5)$$

reemplazando los datos obtenidos anteriormente

$$L_{característica} = 0.97 \text{ mm}$$

evaluando (2.4)

$$Bi = \frac{(655.4 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})(0.97 \times 10^{-3} \text{ m})}{429 \text{ W} / \text{m}^{\circ}\text{C}} = 0.0015 \leq 0.1$$

Con lo cual queda demostrado que la muestra puede ser estudiada por el método de resistencia interna despreciable.

No obstante, se debe comprobar el primer supuesto, en el cual la capacidad calorífica del agua es menor, entonces primero hallaremos la masa total de las muestras, en caso sean usados todos los recipientes de la bandeja:

$$(48)(100 \mu\text{L}) \left(973 \text{ —} \right)$$

Utilizaremos el valor del peso de la bandeja (obtenido del modelo en 3D):

Entonces la capacidad calorífica de las muestras, será:

$$(mxC_p)_{muestras} = (0 \text{ kg})(4195 \text{ C})$$

Y la capacidad calorífica de la bandeja será:

$$(mxC_p) \quad (0 \text{ kg})(230 \text{ C})$$

Realizando la comparación de ambas:

$$(mxC_p)_{muestras} \ll (mxC_p)$$

Por lo cual, se estaría cumpliendo el primer supuesto. Para comprobar definitivamente que ocurrirá este supuesto, se establecerá un tramo del estado transitorio de entre 72°C a 95°C, y se supondrá que la bandeja estará a 95°C para hallar el tiempo que requiere la

muestra para llegar hasta dicha temperatura desde los 72°C, es decir se supondrá que ocurre el segundo supuesto, en el cual la muestra se calentará mucho después que la bandeja. Cabe resaltar que una exigencia para el diseño de este equipo es que la rampa de temperatura en los estados transitorios debe ser en promedio de 1.3°C/s o mayores, dado que temperaturas menores a 1°C/s no son adecuadas para llevar a cabo una buena PCR [8]. Entonces el tiempo que tomará la muestra en llegar a la temperatura establecida, será de:

Mientras que el tiempo que tomará la bandeja en llegar a las temperaturas de este rango, será de:

(2.6)

$$\frac{A(T)}{(420 - T_0) \frac{m}{m}} (23 K) \quad (2.7)$$

Entonces se demostraría el segundo supuesto, en el que la bandeja se calienta más rápido que las muestras se cumplirían. Sin embargo, para este equipo no está comprobado que la rampa de velocidad se cumpla, por lo cual no se podrá asegurar un correcto funcionamiento del Termociclador.

Existe una ecuación más precisa dentro del Método de Resistencia Térmica Interna Despreciable, la cual establece que:

$$T - T_\infty = (T_0 - T_\infty) \exp\left[-\left(\frac{hA}{mC}\right)t\right] \quad (2.8)$$

La precisión viene dada ya que se toma en cuenta la temperatura del fluido circundante (T_∞), que para el caso de la muestra, vendría a ser la bandeja portamuestras. También se está considerando la temperatura inicial T_0 y la final T de la muestra. Con estos valores se reemplazará en la ecuación 2.8, para calcular el tiempo necesario por las muestras.

(se tom $\ln(0)$ no e e)

(Área de transmisión de calor, es decir superficie del cono menos el área de la base)

Por otro lado, el coeficiente convectivo variará debido a que la temperatura entre la bandeja y la muestra también variará en el tiempo. Como el cálculo realizado en la ecuación 2.1, se reemplazan los nuevos valores y se obtiene:

El coeficiente convectivo promedio será:

Reemplazando este valor en la ecuación 2.8, se obtiene el tiempo que tomará en calentar la muestra:

El tiempo obtenido mediante este método es claramente más aproximado que el obtenido inicialmente (17.7 s). Con lo cual se demuestra el primer supuesto, que el tiempo que toma en calentar las muestras es casi simultáneo al tiempo que toma en calentar la bandeja.

Demostrado el primer supuesto en los cálculos previos, se puede concluir que la bandeja portamuestras tiene un buen desempeño con respecto al proceso a realizar. Esto confirma que puede seguir siendo utilizada para la elaboración de un nuevo prototipo.

2.2.2 Células Peltier

Las células Peltier escogidas en el diseño previo [5], cuentan con las siguientes características:

Fabricante: TE Technology

Categoría: High Temperature

Modelo: VT-199-1.4-0.8.

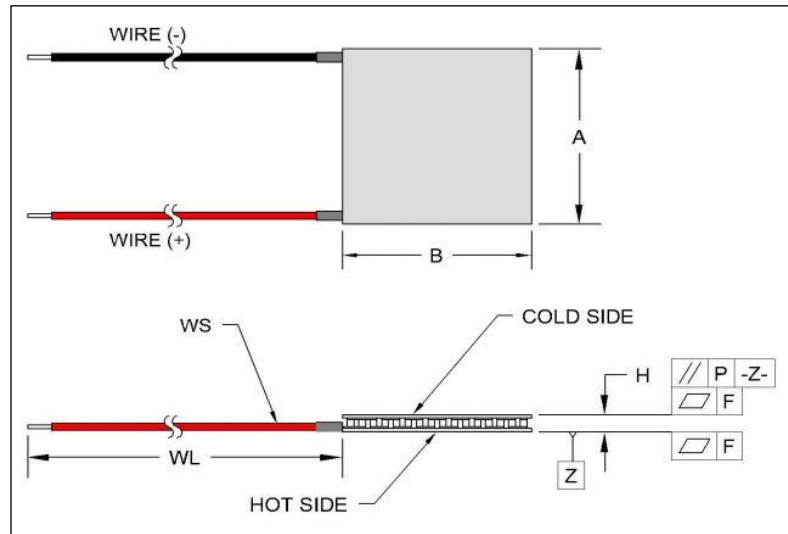


Figura 2.4. Geometría de la célula Peltier

Tabla 2.3. Características de la célula Peltier

Modelo	I_{max} (A)	Q_{max} (W)	V_{max} (V)	DT_{max} ($T_h=300K$)	DT_{max} (Potted)	A (mm)	B (mm)	H (mm)
VT-199-1.4-0.8	11.3	172	24.6	69	66	40	40	3.2

En el prototipo, se ha hecho uso de dos de estas células Peltier de capacidad de calor absorbido máximo de 172 W, por lo cual ambas serán capaces de absorber hasta 344 W, valor por encima al máximo calor dentro de todas las etapas necesarias para el proceso.

Se establece que las etapas necesarias para lograr la PCR, son los mostrados en la tabla 1.1, entre los cuales se puede destacar dos tipos de funcionamientos del Peltier.

El primer funcionamiento del Peltier será el de entregar o evacuar calor para calentar o enfriar la bandeja, es decir donde se hallen las rampas de temperatura (etapa con estado transitorio) tales como la etapa 1, 3, etc. (tabla 1.1.), mientras que el segundo funcionamiento será el de evacuar calor para mantener una determinada temperatura, es decir cuando la temperatura se mantenga constante (etapa con estado estable), tales como la etapa 2, 4, etc. (tabla 1.1.).

Para estos dos tipos de funcionamientos predominantes, a continuación se harán dos ejemplos de cálculo de la potencia de los Peltier.

2.2.2.1 Etapa con estado estable

Se toma como ejemplo de estado estable a la segunda etapa. Para esta etapa se debe mantener una temperatura de 95°C en las muestras durante 30 segundos, tal lo establecido en el acápite 2.2.1.1., se asume que las muestras y la bandeja tienen la misma temperatura. También es importante recalcar que los tubos de muestras se mantendrán en contacto con la tapa que estará a 105°C (señalado en el acápite 1.5.5).

La separación entre los tubos y la tapa es de $\Delta x = 5.5 \text{ mm}$.

Para calcular la potencia que es necesaria, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{k A_{\text{trans}} (T_{\text{tapa}} - T_{\text{bandeja}})}{\Delta x} \quad (2.9)$$

Donde: A_{trans} : Área de transmisión, en este caso ($74 \times 56 \text{ mm}^2 = 0.00414 \text{ m}^2$)

k : Conductividad térmica el aire (30.10^{-3} W/m.K) \rightarrow [Tomado a la temperatura media entre 105°C y 60°C, aproximadamente 350 K]

T_{tapa} : Temperatura de la tapa (105°C)

T_{bandeja} : Temperatura de la bandeja (varía entre 95°C y 60°C, se tomará $T_{\text{bandeja}} = 60^\circ\text{C}$) \rightarrow [Ya que la mayor transferencia de calor ocurre cuando hay mayor diferencia de temperatura entre la tapa y la bandeja]

Δx : Espesor de la capa de aire, el cual por mediciones se obtuvo que es 5.5mm.

Reemplazando, se obtiene:

$$\dot{Q} = \frac{k A_{\text{trans}} (105^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C})}{\Delta x}$$

\dot{Q}

El valor hallado es el calor que deberá evacuar el Peltier durante esta etapa, sin considerar las pérdidas en los alrededores. Dado que el valor es pequeño, se supone que

las pérdidas serán mayores, por lo cual es probable que el Peltier en vez de evacuar calor tenga que aportar. Esto será evaluado mediante la experimentación.

2.2.2.2 Etapa con estado transitorio

Se toma como ejemplo de estado transitorio a la tercera etapa. Para esta etapa se debe enfriar a las muestras desde 95°C a 60°C.

Se asumirá que la rampa de temperatura es de 1.3°C/s, con lo cual podemos establecer el tiempo que tomará el cambio de temperaturas:

Se puede establecer que el calor que deberá evacuar el Peltier debe estar definido por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{m C_p \Delta T}{t} \tag{2.10}$$

Donde: m : Masa de la bandeja (0.553 kg)

C_p : Capacidad calorífica del material de la bandeja (230 J/kg.K)

ΔT : Diferencia de temperaturas del estado

t : Tiempo de la transición

Reemplazando, se obtiene:

$$\dot{Q} = \frac{0.553 \text{ kg} \cdot 230 \text{ J/kg.K} \cdot (95^\circ \text{C} - 60^\circ \text{C})}{t}$$

Este resultado se puede interpretar como el calor que necesita ser evacuado para lograr alcanzar la temperatura de 60°C en el tiempo establecido.

A continuación se muestra un resumen de características dentro de todas las etapas necesarias para el proceso de la PCR.

Tabla 2.4. Valores hallados para cada etapa del ciclo

Etapas	Temperatura (°C)	Calor (W)	N° de Biot	Tiempo (s)
1	4 - 95	166	0.047	56.2
2	95	0.23	-	30
3	95 - 60	166	0.098	26.9
4	60	1	-	30
5	60 - 72	166	0.28	9.2
6	72	0.8	-	30
7	72 - 95	166	0.15	17.7
8	72 - 4	166	0.05	52.3
9	4	2.3	-	30

Estos resultados presentan una diferencia con respecto a los cálculos anteriores. Los resultados hallados en la tabla 2.4., se puede observar que el máximo valor de calor que tendrá que ser absorbido por los Peltier es de 166W, mientras que estos componentes fueron seleccionados para absorber 200 W. La reducción de potencia, se debe a que la bandeja diseñada previamente poseía mayor masa a la fabricada, lo cual afecta directamente al cálculo de calor evacuado.

Finalmente se puede concluir que los Peltiers funcionarán a una capacidad menor (83 W cada uno), pero que sin embargo no incurre en ningún problema para el funcionamiento en el proceso, por lo cual pueden seguir siendo utilizados en la elaboración de un nuevo prototipo.

2.2.3 Sistema Disipador – Ventilador

El disipador debe encargarse de evacuar calor en las etapas de enfriamiento del ciclo, este calor no incluye solamente el que se absorbe de la cara fría, sino también, el generado por efecto Joule. Aplicando el primer principio de la termodinámica, resulta

que la potencia eléctrica suministrada a los Peltier será la diferencia entre los flujos caloríficos de disipación y se absorción, con lo cual se puede concluir en las siguientes expresiones:

(2.11)

$$\alpha(T)I \quad (2.12)$$

Con la expresión 2.12, establecemos los dos principios más importantes que gobiernan el funcionamiento de la célula Peltier: el efecto Peltier y el efecto Joule [12].

Dicho lo siguiente, evaluaremos el funcionamiento del disipador para las etapas de enfriamiento, que es en la cual debe ayudar a la disipación de calor, y en la etapa de calentamiento, en la cual el disipador actúa como pérdida.

Cabe resaltar que se tomará como un sistema al disipador y al ventilador, pues ambos deben funcionar conjuntamente en la etapa de enfriamiento.

2.2.3.1 Ciclo de enfriamiento de las muestras

La etapa más importante del ciclo de enfriamiento ocurre desde 95°C a 60°C, si bien la caída de temperatura más grande se presenta desde los 72°C a 4°C, esta sólo se presenta una vez y además no es un requerimiento obligatorio llevar las muestras a 4°C al final de la PCR. Es importante recalcar que la rampa de temperatura deseada para este proyecto es de 1.3°C/s, necesitándose evacuar de la bandeja un calor igual a 166 W para lograrlo, pero para asegurar una rampa mayor es necesario evacuar una cantidad de calor mayor, de esta forma se tendrán en cuenta las pérdidas, la no uniformidad de la distribución de temperaturas y otras irregularidades que pueden presentarse en el proceso.

Para el cálculo del calor que hay que disipar de la cara caliente del Peltier, se asumirá que las caras calientes del Peltier están a una temperatura $T_H=50^\circ\text{C}$, ya que es aproximada y existen curvas de funcionamiento del componente. Dado que en la mayoría de etapas transitorias la temperatura está por encima de los 50°C, por lo que la diferencia de temperatura entre la cara caliente y la cara fría será de 0°C ($\Delta T=0^\circ\text{C}$), por

lo que los valores de corriente y voltaje elegidos deberá generar un valor de calor absorbido mayor a los 83 W.

Los valores asumidos para los anteriores trabajos [9], nos dan:

Con estos valores podemos hallar el calor absorbido por el Peltier, según las curvas del fabricante para el Peltier seleccionado (Anexo 1).

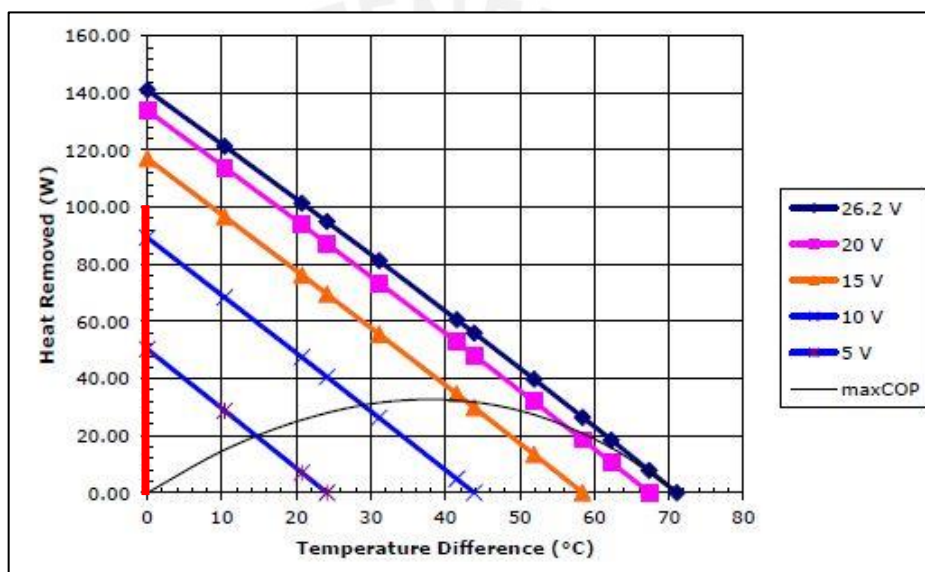


Figura 2.5. Curva de calor absorbido vs. Delta T del fabricante Peltier

Según se observa en la curva, no existe el voltaje de 12 V, entonces se procederá a interpolar el calor para este voltaje y una diferencia de temperatura de 0°C, dando como resultado el valor de 99.2 W, que efectivamente es mayor al valor de 83 W.

Finalmente el calor a disipar por la cara caliente será:

$$2(5 \text{ A})(12 \text{ V}) = 2(99 \text{ W})$$

Para esta etapa es necesario evacuar calor de forma efectiva para que el sistema funcione correctamente, por lo cual en los trabajos anteriores fue analizado el uso de un

disipador de la empresa Pada Engineering, tipo extruded, código 8586, con las siguientes características:

Tabla 2.5. Datos del Disipador seleccionado previamente

Código	Peso (kg/m)	Rth (°C/W)	Material	Conductividad (W/m.k)
8586	9.815	1.02	Aleación de aluminio AW-6060	200 - 240

Dado al elevado precio y a la difícil importación del componente, se decidió fabricar uno con planchas de aluminio unidas mediante tornillos, los cuales reducen la capacidad de disipación y no son ideales.



Figura 2.6. Disipador utilizado en el prototipo

Este disipador fabricado localmente no es uniforme por lo cual no tendría un buen funcionamiento. Se buscará un nuevo disipador que esté de acuerdo a las especificaciones anteriores, con el cual se podrá calcular el nuevo flujo de aire necesario para disipar correctamente el calor y proceder a la comprobación del funcionamiento del ventilador.

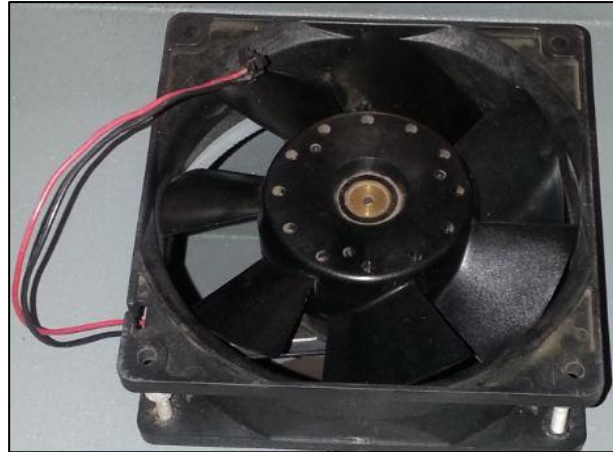


Figura 2.7. Ventilador utilizado en el prototipo

2.2.3.2 Ciclo calentamiento de las muestras

Para las etapas de calentamiento se puede considerar que el Peltier también presenta un buen desempeño calentando [14], y el caso más complicado será cuando deberá elevar la temperatura hasta 95°C , para estas situaciones se puede utilizar el Peltier como resistencia eléctrica, de tal forma que la potencia generada por el efecto Joule caliente la bandeja, y por ende, también las muestras.

El detalle anterior se explicará ahora con mayor detenimiento. Teniendo el Peltier un $\Delta T_{\text{máx}}=67^{\circ}\text{C}$, si se elevase la temperatura de la cara caliente a $T_{\text{H}}=95^{\circ}\text{C}$, la cara fría tendría como mínimo $T_{\text{C}}=28^{\circ}\text{C}$, y estando el aire en la zona del disipador a la temperatura ambiente de más o menos $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$, sería termodinámicamente imposible que se absorba calor del aire. Sin embargo, el disipador debería encontrarse a una temperatura más alta, por lo que el Peltier podría absorber calor de este, enfriándolo. Por otro lado, aún será necesario evaluar el calor que se producirá debido al efecto Joule, esto permitirá averiguar si es suficiente para lograr la potencia requerida para el calentamiento. Utilizando las gráficas de igual manera se eligen

$$I = 9\text{ A}$$

$$V = 20\text{ V}$$

por lo que el calor producido por efecto Joule será

$$\dot{Q} = I.V = (9\text{ A})(20\text{ V}) = 180\text{ W}$$

Como el valor anterior es sólo de un Peltier, para el sistema de 2 Peltier sería

$$\dot{Q}_{total} = 360 W$$

que es más de la tasa de calor requerida. Pero se debe considerar que este calor fluirá tanto hacia la cara fría como hacia la cara caliente, es decir, una parte irá a la bandeja, y otra parte irá hacia el disipador, si consideramos este último como una pérdida, entonces 360 W sería un valor adecuado, ya que incluiría las pérdidas (a través del disipador) y el calor necesario para elevar la temperatura de la bandeja, y por ende, de las muestras.

El análisis anterior se dejará a la simulación por computadora, pero si se debe tener claro, que para las etapas de calentamiento el ventilador deberá estar apagado para disminuir las pérdidas de calor en el lado del disipador. Otra forma de ayudar a disminuir las pérdidas, es aislando el borde de la bandeja portamuestras como ya se mencionó antes, el asilamiento podría ser una sucesión de placas de cerámicas y/o elastómeros termoplásticos.

2.3 Cálculos de componentes no analizados anteriormente

En esta sección se abordaron los dos componentes principales que no fueron calculados (tapa y carcasa) y que influyen en la buena operación del módulo termo-mecánico.

2.3.1 Tapa

La tapa es un componente importante dentro del funcionamiento del Termociclador, dado que cumple las siguientes funciones:

- Sellar herméticamente las muestras, para no alterar el contenido de las mismas y garantizar su asepsia.
- Evitar el fenómeno de convección natural por cambio de densidad (movimiento de recirculación del fluido), esto debido a que si se da esta situación el calor que se suministra a las muestras no se distribuye de manera uniforme, y produciría efectos no deseados.
- Evitar la evaporación de las muestras.

2.3.1.1 Diseño general del cuerpo de la tapa

Para el diseño general del cuerpo de la tapa, se debe tener en consideración a los nuevos componentes basados en la bibliografía, los cuales recomiendan que esta siempre deba mantenerse a 105°C (como se explicó en la figura 2.6), ya que la bandeja tendrá una temperatura siempre menor a esta (máxima de 95°C). Este efecto ocasionará que exista una transferencia de calor por conducción a través del aire encerrado, desde la tapa, hacia la bandeja y las muestras.

Para lograr la temperatura mencionada anteriormente, se han incluido resistencias eléctricas especiales, aconsejadas para equipos de laboratorio. Dado que estas resistencias llegarán a una temperatura elevada (105°C), por el fenómeno de conducción, toda la tapa tendrá una temperatura elevada lo cual imposibilita la correcta manipulación de esta. Por lo expuesto anteriormente se debe colocar un aislante alrededor de la tapa, para disminuir la temperatura superficial.

El ensamble de las resistencias eléctricas y el aislante, será colocado dentro de un cuerpo interior, el cual es diseñado para el acople directo con la bandeja y las muestras. Una de las exigencias para esta tapa es que la altura no debe ser mayor a 50 mm, por lo cual el aislante seleccionado deberá ser menor a dicha dimensión.

El cuerpo interior deberá ir conectado a otra superficie que estará en contacto con el usuario, al cual llamaremos cuerpo exterior, con un cierto espaciamiento en el cual fluirá aire y que actuará como aislante para reducir la temperatura superficial. La conexión entre ambos, deberá ser aislada también, de tal manera que la temperatura superficial del cuerpo interior no sea transmitida al cuerpo exterior de la tapa.

A continuación se muestra el ensamble del cuerpo interior, en el cual se incluyen las resistencias (calentadores de poliamida), con el aislante para poder obtener adecuadas temperaturas de trabajo.

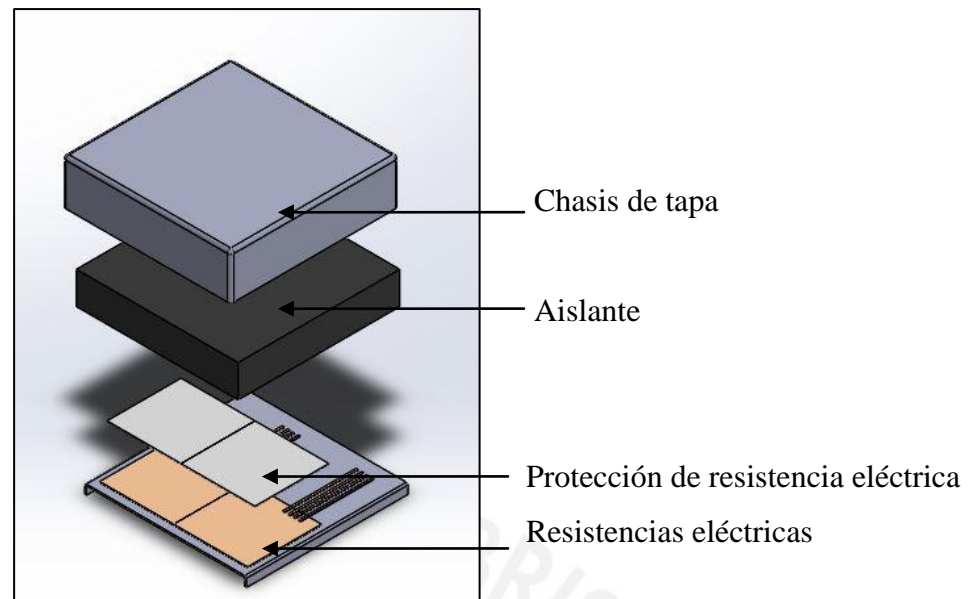


Figura 2.8. Ensamble del chasis de tapa

Al cuerpo interior se le soldarán unas “orejas” para unirlo al cuerpo exterior mediante uniones atornilladas. Estas uniones atornilladas deberán ser aislantes para evitar la conducción de calor entre ambas.

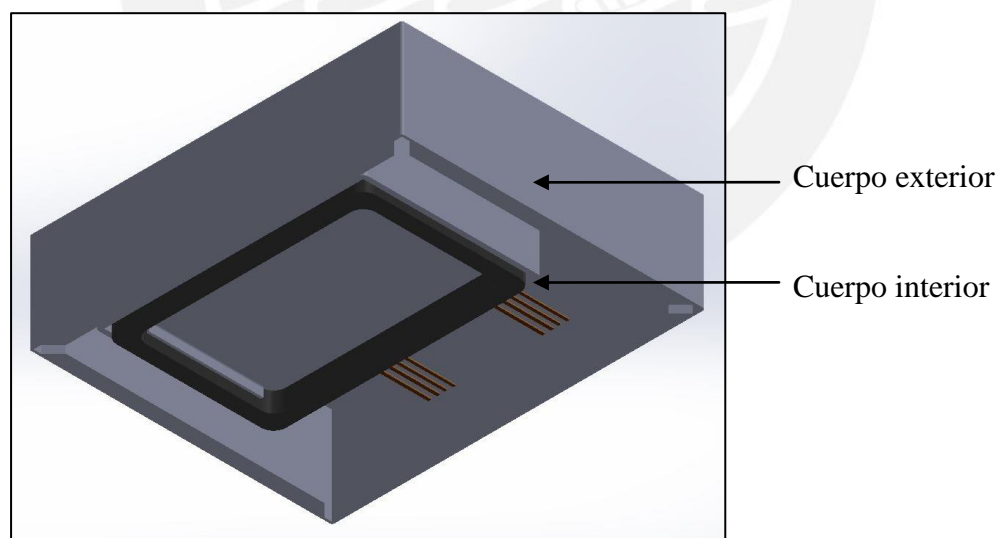


Figura 2.9. Vista isométrica inferior del arreglo

2.3.1.2 Aislamiento térmico

El aislamiento térmico que se colocará en el chasis de la tapa, tiene la finalidad de evitar altas temperaturas en la superficie. Se propone que la temperatura sea de 45°C, para lo

cual se calculará el espesor del aislante, mediante las siguientes expresiones, en las superficies planas:

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección natural y forzada, desde la superficie aislada hacia el ambiente, h_c (W/m^2K):

$$\left[\frac{C}{(T_{sup} - T_a)} \right] [1.8 \times (T_{sup} - T_a)] \times (V)$$

Donde: C = Coeficiente de forma, en este caso 1.79 para superficies planas

T_{sup} = Temperatura supuesta de la superficie del termoaislante [K]

T_a = Temperatura de ambiente [K]

V = Velocidad del viento [m/h]

En este caso se consideran despreciable la transferencia de calor por radiación y no existe viento, dado que la superficie debe ser hermética, con lo cual obtenemos:

Se supone que la temperatura de la superficie será de 45°C y la de ambiente 25°C.

$$\left[\frac{C}{(T_{sup} - T_a)} \right] [1.8 \times (T_{sup} - T_a)]$$

Se asume un espesor de aislante de 20 mm, con lo cual se procede al cálculo de flujo de calor por unidad de área:

$$\frac{(T_{op} - T_a)}{e}$$

Donde: T_{op} = Temperatura de operación [K]

T_a = Temperatura de ambiente [K]

e = espesor del aislante [m]

k_{ais} = Conductividad térmica del termoaislante [W/mK]

h_c = Coeficiente de convección [W/m²K]

En este caso se ha escogido como termoaislante a la espuma de Poliuretano con una conductividad térmica de 0.02 W/mK, tal como se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.10. Termoaislante de material espuma de poliuretano (www.promaterial.com)

Con lo cual se obtiene un flujo de calor de:

$$\frac{(105 \quad 25)}{[\quad \quad]}$$

Realizamos una comprobación de la temperatura de la superficie:

Esta temperatura de 36°C estará ubicada en la superficie interna de la tapa, y con el flujo de aire entre esta y la tapa exterior, la temperatura disminuirá para el contacto con el usuario.

2.3.1.3 Resistencia eléctrica

Para mantener la temperatura de 105°C, tal lo expuesto anteriormente es necesario el uso de una resistencia eléctrica. Mediante la literatura se encontró el uso de calentadores

de poliamida, también conocidos como calentadores Kapton, las cuales consisten en unas placas flexibles de poliamida con resistencia interior y conexión a voltaje según la especificación. El esquema de esta placa es mostrado en la figura 2.10.

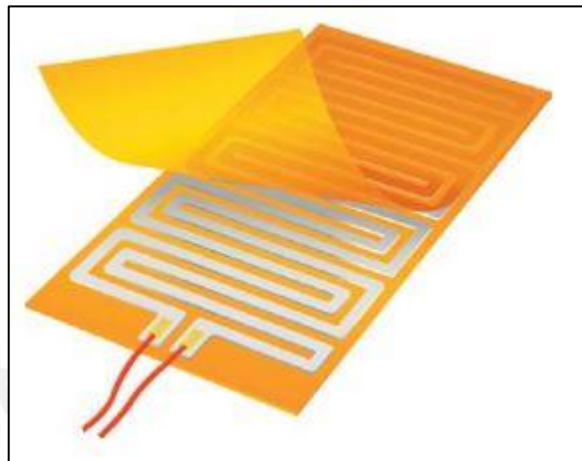


Figura 2.11. Calentador de poliamida (Kapton)

El calor que debe ser suministrado por este calentador será calculado con la siguiente expresión, que es recomendación de los fabricantes:

$$\frac{m C_p (T_{op} - T_a)}{t}$$

Donde: m = masa de la superficie a calentar, en este caso la plancha metálica (44.36 g)

C_p = capacidad calorífica

T_{op} = Temperatura deseada de la superficie

T_a = Temperatura de ambiente

t = tiempo de transición de temperaturas

$$\frac{(105 - 25)}{t}$$

El resultado nos muestra el valor necesario de potencia suministrada por la el calentador de poliamida, sin embargo es importante considerar un margen de al menos 25%, con lo cual se obtiene que la potencia requerida es de 75 W aproximadamente.

El fabricante seleccionado para estos calentadores de poliamida es la empresa *Minco Heaters*, el cual tiene una herramienta útil para la selección de los calentadores basados en medidas deseadas del calentador. Dado que este calentador debe cubrir toda la superficie de la bandeja portamuestras, que es aproximadamente de 74 x 56 mm, se ha procedido a escoger el modelo HK5446, con las siguientes características:

Tabla 2.6. Datos del calentador HK5446

Dimensiones (LxA) (mm)	63.5 x 76.2
Cable de conexión	26 AWG
Voltaje de operación	120 V
Corriente de operación	5 A
Temperatura de operación	25 °C
Resistencia	210 Ω
Potencia	68.57 W
Densidad watt	1.6601 W/cm ²

2.3.2 Carcasa

La carcasa, como en todos los equipos tiene una función de dar soporte y protección a todas las partes del equipo. Además de tener la forma y dimensiones adecuadas para el correcto ensamblaje de todo el conjunto.

2.3.2.1 Diseño general del cuerpo de la carcasa

Este modelo se seleccionó teniendo en cuenta lo desarrollado hasta el momento en los capítulos anteriores, es decir, los componentes, sus dimensiones, la disposición de estos, el tamaño de la caja que se utilizó para el análisis del disipador, además de los métodos de unión que se utilizarán para el ensamble físico del sistema.

Para el diseño de la carcasa se han tomado en cuenta los siguientes factores:

- Abertura para el ingreso de aire al ventilador.
- Espaciamientos entre el disipador y la carcasa para el flujo de aire interior.
- Aberturas para la salida de aire caliente del sistema.

- Abertura para la disposición de la bandeja.
- Alojamiento de un aislante para evitar la disipación de calor al ambiente.

Además de las consideraciones anteriores, se ha buscado en la bibliografía antecedentes de la variedad de diseños realizados por las diferentes empresas que fabrican termocicladores, pero existe uno en especial, que considera el sistema termoeléctrico y electrónico (o de control) de forma separada, que se conoce como *The Remote Alpha Dock System*, y es fabricado por la empresa *MJ Research*. El diseño puede verse en la figura 2.12, extraída del catálogo de la empresa [6].



Figura 2.12. The Remote Alpha Dock System de la marca MJ Research.

Como se puede observar, la característica principal de este diseño es que la parte termo-mecánica está separada de la parte electrónica (control), las cuales se unen a través de cables que se conectan a puertos, en el caso de la parte termo-mecánica, los puertos se encuentran en la parte inferior, tal como se puede apreciar en la figura 2.13.

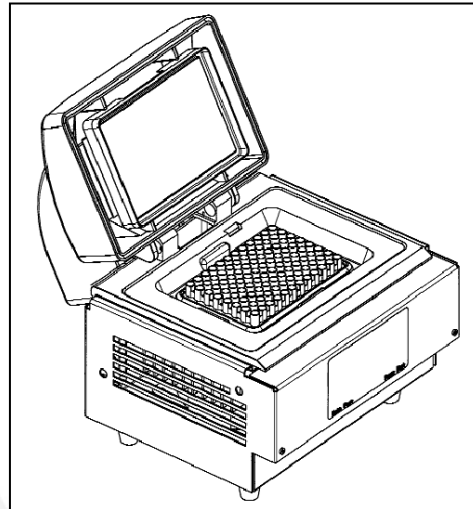


Figura 2.13. Características físicas de la parte termo-mecánica de *The Remote Alpha Dock System*.

La figura 2.13 muestra más claramente la estructura de la parte termo-mecánica. La forma de la carcasa para esta tesis será similar a la mostrada en dicha figura. Las características más resaltantes de este diseño, son las salidas de aire a los costados del equipo, y las patas en la parte inferior que permiten el ingreso de aire al ventilador, por otro lado, el diseño de la figura 2.13 es para 96 tubos, y el de este trabajo es para 48. Dentro de la carcasa deberá ir alojado el ensamble de componentes especificados anteriormente, similares al siguiente esquema:

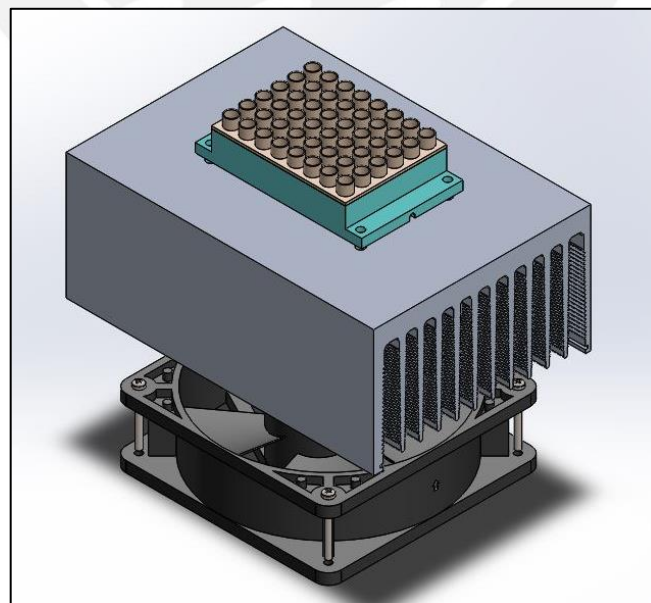


Figura 2.15. Ensamble del sistema termo-mecánico con el uso de Peltier.

Dadas las características y condiciones para el diseño de la carcasa, se obtuvo el siguiente diseño, mostrado en la figura 2.16. Cabe resaltar que para el ingreso del aire al ventilador, se colocará una rejilla para protección del mismo.

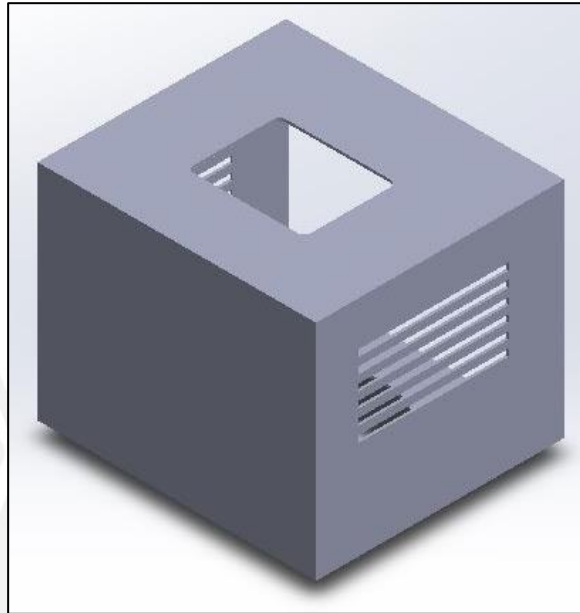


Figura 2.16. Vista isométrica de la carcasa

2.3.2.2 Aislamiento térmico

El aislamiento térmico seleccionado para el contorno paralelo a la bandeja, tiene la función de disminuir las pérdidas consideradas en la evacuación de calor para las etapas de calentamiento del ciclo. Consideraremos para el cálculo la etapa desde 25°C a 95°C, por lo cual el coeficiente de convección sería:

$$\left[\text{-----} \right] \quad [1 \quad (368 \quad 298)]$$

Se asume un espesor de aislante de 20 mm, que es la altura de la bandeja más el Peltier que deberán ser aisladas, con lo cual se procede al cálculo de flujo de calor por unidad de área, considerando que no hay ningún flujo de aire dentro de la bandeja y los Peltiers.

El flujo de calor debe ser el suministrado por los Peltiers para esta etapa, que es 166 kW.

$$\frac{(95 \quad 25)}{\left[\begin{array}{c} \text{---} \quad \text{---} \\ \text{---} \quad \text{---} \end{array} \right]}$$

Por lo cual un buen aislante sería el Poliuretano que tiene una conductividad térmica mayor a la solicitada de 0.19 W/mK.



Figura 2.17. Termoaislante de Poliuretano seleccionado para el contorno de la bandeja

2.3.2.3 Rejilla inferior

El prototipo actual presenta el ventilador abierto, expuesto al contacto de otras superficies, tal como se muestra en la figura 2.18.



Figura 2.18. Vista inferior del prototipo.

La admisión del aire hacia el ventilador debe ser mediante una rejilla perforada para proteger al ventilador de posibles intromisiones dentro de la carcasa, a su vez permitiendo el flujo necesario para la ventilación adecuada en las etapas de enfriamiento. Esta rejilla está esquematizada en la figura 2.19.

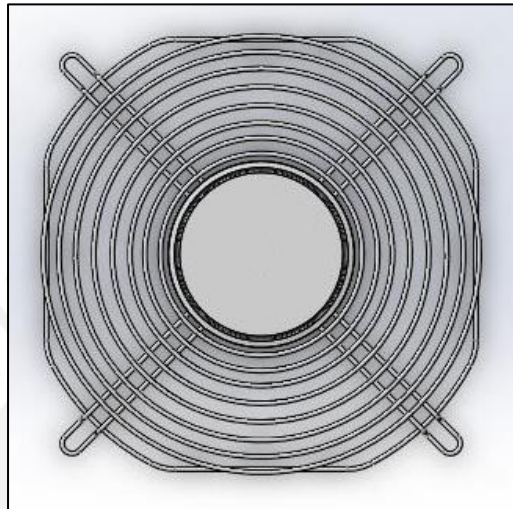


Figura 2.19. Rejilla inferior para paso de aire al ventilador

Con la inclusión de estos nuevos elementos, el ensamble final queda como el de la figura 2.20.

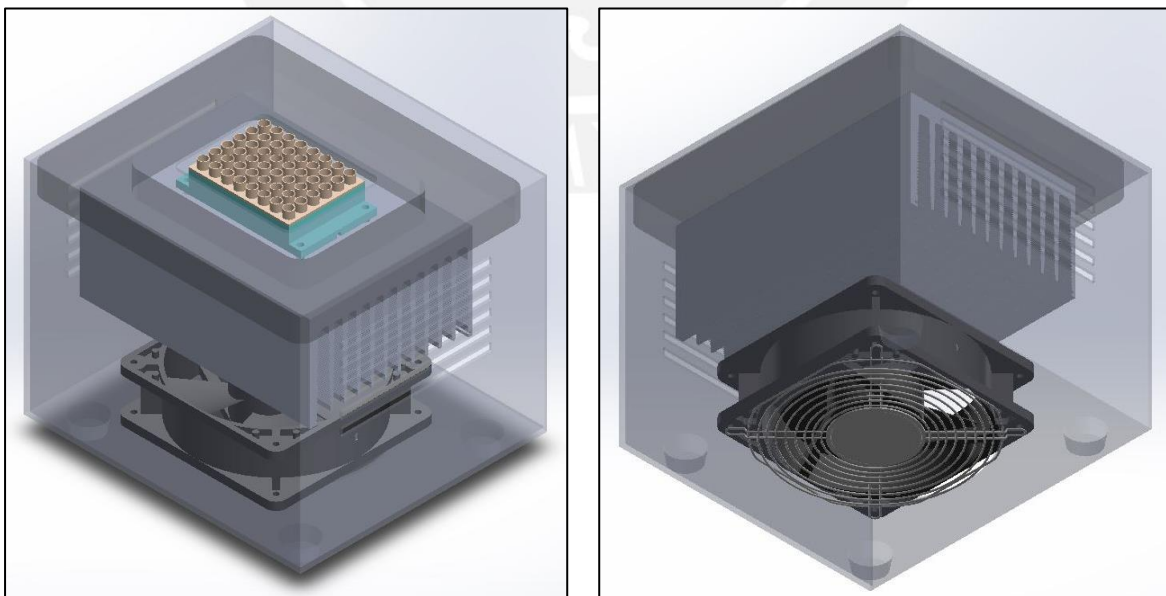


Figura 2.20. Izquierda: Vista isométrica de la carcasa del conjunto. Derecha: Vista inferior

CAPÍTULO 3

VERIFICACIÓN DEL MÓDULO TERMO-MECÁNICO MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

3.1 Introducción

En el presente capítulo se realizó la verificación del módulo termo-mecánico. Se necesita predecir el comportamiento del flujo de aire, la transferencia de calor, entre otros, mediante métodos computacionales, para poder comprobar los cálculos analíticos realizados.

Este tipo de estudio es realizado mediante el principio de dinámica de fluidos computacional (CFD). El proceso de la dinámica de fluidos computacional es la aproximación de una variable continua en un número finito de puntos, a esto se le conoce como *discretización*, como se puede observar en la figura 3.1.

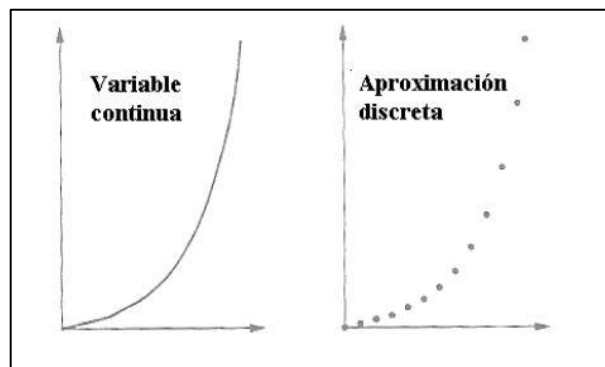


Figura 3.1. Discretización de variables

Los elementos principales en la dinámica de fluidos computacional (CFD) son:

- 2 Discretización del flujo continuo, es decir las variables de campo se aproximan por un número finito de valores en puntos llamados nodos.
- 3 Las ecuaciones de movimiento también se discretizan, es decir, aproximadas en función de los valores en los nodos:
- 4 El sistema de ecuaciones algebraicas se resuelven y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos.

El método de los volúmenes finitos emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral. Este método fue utilizado por primera vez por McDonald para la simulación de un problema 2-D no viscoso.

Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial. La integral de superficie que aparece en el término de la derecha de la ecuación de **Navier-Stokes** completa (en su forma integral) es aproximada por la suma de los flujos que atraviesan cada una de las caras del poliedro.

El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y la energía.

ANSYS CFX es un software de alto rendimiento para la dinámica de fluidos de uso general. Este software ha sido utilizado para resolver una amplia gama de problemas acerca del flujo de fluidos.

Este software tiene grandes ventajas tales como la tecnología avanzada de su solucionador, que es la clave para lograr soluciones fiables y precisas de forma robusta y rápida.

Este capítulo verifica los cálculos realizados en el capítulo 2, mediante los métodos mencionados. Se identificó que primero se debe realizar la simulación el conjunto bandeja porta-muestras, peltier y disipador, a los cuales llamaremos sub-sistema módulo termo-mecánico, dado que se puede interpretar el comportamiento del calor a través de estas superficies. Luego, se realiza la simulación del sistema completo, para identificar la influencia sobre las muestras de los demás elementos.

3.2 Procedimiento de trabajo para la simulación

Para realizar las simulaciones de los conjuntos, se debe contar con un procedimiento para la utilización del software, el cual será descrito mediante una tabla que contiene la acción y la descripción de esta.

Tabla 3.1. Procedimiento general para la simulación

Paso	Acción	Descripción
1	Iniciar Ansys Workbench V15.0	Se nombra un nuevo proyecto de simulación.
2	Iniciar la geometría del conjunto a simular	Es posible importar la geometría de cualquier software CAD. También se puede utilizar el Desing Modeler (DM) para modificar y/o crear una nueva geometría.
3	Generar el dominio exterior	En este caso, el dominio exterior será el aire. Para crear el flujo externo se hace uso del comando “Enclosure”, con dimensiones generales equivalentes al triple de las dimensiones del disipador.
4	Generar el mallado de cada volumen de control	Se realiza a través del Ansys Mesh. La generación de las mallas será independiente.
5	Suprimir geometrías externas	Dado que se malla independientemente cada dominio, se suprimen todos los dominios ajenos mediante el comando “Supress Body”.
6	Establecer referencias para las interfaces	El software denomina a esta acción como “Named Selection”. Se deben nombrar a todas las superficies de interés para tener una fácil manipulación de ellas cuando se realicen las operaciones de interfaces entre un cuerpo y otro.
7	Establecer el tamaño de elementos en las superficies	Dado que algunas superficies se necesita conocer con mayor exactitud el resultado, se les asigna un mayor valor de tamaño de malla, para que pueda ser más fina.

		Se utiliza el comando “Face Sizing”.
8	Establecer parámetros de mallado general	Se establece: - Física de Preferencia: CFD - Solucionador de Preferencia: CFX - Relevancia = 0 - Para todas las superficies de mayor interés se ha establecido un tamaño de malla de 1 mm. - Para las demás superficies dependiendo del tamaño se ingresan los “face sizing” necesarios. - De ser el caso, se utilizan los patrones de conformado de malla, para el tipo tetraédricos.
9	Establecer parámetros de control de simulación	Es la etapa definida como pre-procesamiento o “Setup”.
10	Establecer parámetros básicos para el software	Dado que las muestras tienen un comportamiento similar al agua, se simulan como esta. Además se necesita conocer la influencia del aire. Por tanto, se presentan estos dos fluidos. - Definir Fluidos: “Agua” y “Aire” - Tipo de fluidos: Fluido continuo - Presión de Referencia= 1 atm
11	Establecer los parámetros para el tipo de análisis	Se desea conocer el comportamiento de la muestra en el tiempo, por lo tanto es un análisis transiente. Los análisis realizados serán para un solo ciclo de la PCR. -Tipo de análisis: Transiente -Tiempo total del análisis: 200.5 s -Paso de tiempo: 0.5 s
12	Establecer los dominios	Se establecen de acuerdo a los volúmenes que haya en cada análisis. Por ejemplo: Aire, Bandeja portamuestras, Disipador, Probetas, etc.
13	Establecer los parámetros dentro de los dominios fluidos	Se establece el porcentaje de volumen de cada uno respecto a la superficie seleccionada. - Transferencia de calor: Total energy - Turbulencia: k-Épsilon Inicialización: - Componentes de velocidad: (0,0,0) m/s - Presión estática: 1 atm

		- Temperatura: Para todos los dominios excepto el de las muestras será la temperatura de ambiente (20°C), mientras que para las muestras se toma como 4°C, como es descrito en la PCR.
14	Establecer los parámetros dentro de los dominios sólidos	<ul style="list-style-type: none"> - Se selecciona la superficie del dominio - Se establece el material del dominio, con sus respectivas propiedades físicas. - Transferencia de calor: Thermal energy Inicialización: <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura: Ambiente (20 °C)
15	Establecer las condiciones de borde en los dominios	Las condiciones de borde varían respecto a los dominios, entre los comunes tenemos los siguientes: <ul style="list-style-type: none"> -Condición de borde “PARED AIRE”: Establecida en el dominio del aire. Tipo de condición de borde: Symmetry -Condición de borde “FLUJO PELTIER”: Establecida en el dominio de la bandeja portamuestras y el disipador. Tipo de condición de borde: Wall Detalles de la condición de borde: Heat Flux Flujo de calor: Q_{calor}^1 ¹ Expresión creada con respecto a la función de calor otorgado por los Peltier.
16	Establecer Interfaces	Las interfaces son la conexión entre dos dominios. Para estas simulaciones pueden ser del tipo “Fluid Fluid”, “Solid Fluid” o “Solid Solid”
17	Establecer la fracción de volumen	Para establecer el volumen de las muestras, por lo cual se crea la siguiente expresión con respecto al sistema de coordenadas global. $\text{if}(y > 2.5[\text{mm}], 1, 0) * \text{if}(y < 23[\text{mm}], 1, 0) * \text{if}(x > 9[\text{mm}], 1, 0) * \text{if}(x < 83[\text{mm}], 1, 0) * \text{if}(z < 56[\text{mm}], 1, 0) * \text{if}(z > 0[\text{mm}], 1, 0)$

18	Establecer parámetros de control para el solucionador (Solver Control/Basic Settings)	- Control de convergencia= 1-10 loops - Residual Target= 10E-4
19	Establecer parámetros para el control de la salida (Output Control)	Agregar resultados transientes “Transient Results 1” Frecuencia de salida: Cada paso de tiempo (0.5 s)
20	Iniciar etapa de solución	Se ejecuta el CFX- Solve y se espera hasta que finalicen los 200.5 s del análisis transiente.
21	Visualizar resultados	Se ejecuta el CFX-Post. Se evalúan los resultados dependiendo de la ubicación de interés.

3.3 Simulación del sub-sistema Bandeja-Peltier-Disipador

Este sub-sistema es el más básico para realizar la evaluación de temperaturas dentro de la bandeja, debido al efecto de los Peltiers, que actúan como fuentes de calor. Además se acopla al conjunto el disipador de calor, para las etapas de enfriamiento dentro del proceso.

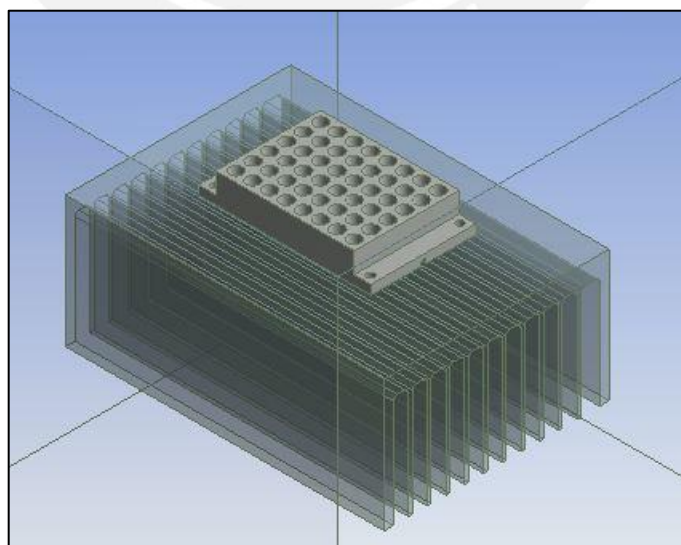


Figura 3.2. Sub-sistema módulo termo-mecánico

3.3.1 Descripción del problema

Para lograr el proceso descrito para la PCR, es necesario llegar a dichas temperaturas en la bandeja portamuestras mediante la fuente principal de calor, que en este caso son los Peltiers. Además es importante el uso del disipador, tal lo descrito en el acápite 2.2.3.

El fondo del siguiente análisis consiste en determinar el comportamiento de las temperaturas en la bandeja portamuestras, para establecer esto como punto de partida para una siguiente simulación con la placa de tubos y las muestras.

Dado que no está considerada la carcasa del conjunto, se toma en cuenta la influencia del aire en el sub-sistema.

Se trata de demostrar que las muestras se calientan al mismo tiempo que la bandeja portamuestras es calentada, tal lo calculado en el acápite 2.2.1, mediante la utilización del software ANSYS CFX versión 15.0.

3.3.2 Modelos CAD

La creación de los volúmenes de control de todos los componentes ha sido desarrollada con el software SolidWorks. Para evitar los posibles conflictos entre ambos softwares, se ha importado la geometría creada inicialmente al software de modelamiento de ANSYS, Design Modeler (DM), y se terminó de crear las geometrías dado la buena precisión y preparación para la simulación por elementos finitos.

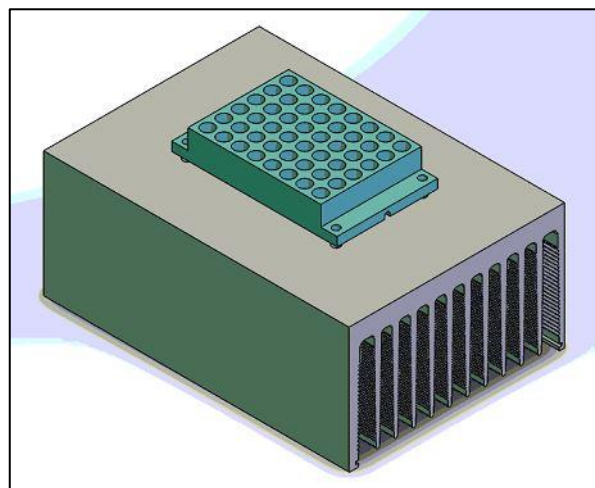


Figura 3.3. Modelo CAD del sub-sistema

3.3.3 Generación del mallado

El mallado es la etapa del pre-procesamiento en donde se debe dividir a los volúmenes en nodos descritos anteriormente. Con la finalidad de que las mallas de cada elemento sean compatibles, se ha generado la malla de cada elemento por separado. Cabe resaltar que se han elaborado mallas más densas en algunas zonas para realizar un mejor estudio.

En el mallado del dominio de la bandeja portamuestras se obtuvo una calidad de malla promedio del 83%, Relación de Aspecto máximo de 1.85, oblicuidad y una ortogonalidad promedio de 0.85. Esto según bibliografía de ANSYS nos da un buen indicador de que la malla es correcta para proseguir con el mallado del sólido. A continuación se muestra la imagen de la superficie mallada del dominio de la bandeja portamuestras.

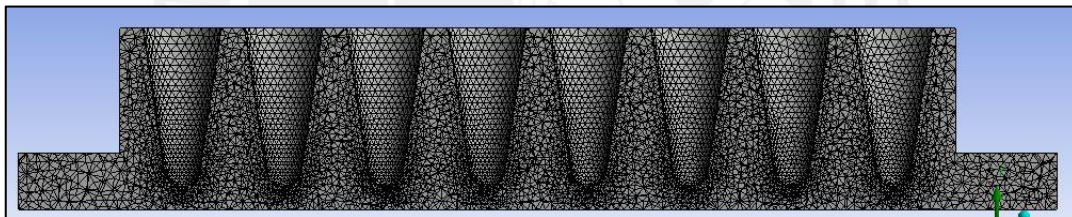


Figura 3.7. Vista en sección de la malla de la bandeja portamuestras

En la figura 3.8 se muestra el mallado del disipador se obtuvo una calidad de malla promedio del 82%, Relación de Aspecto máximo de 1.9, oblicuidad y una ortogonalidad promedio de 0.84.

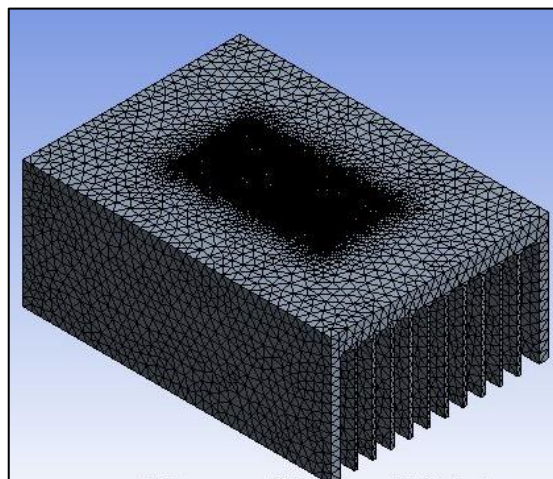


Figura 3.8. Vista de la malla del disipador

Dado que es importante conocer el efecto del calor sobre las caras del peltier en el disipador, esta área fue mallada con un menor tamaño (1 mm). En la figura 3.9 se puede apreciar la diferencia entre ambas mallas en un solo cuerpo.

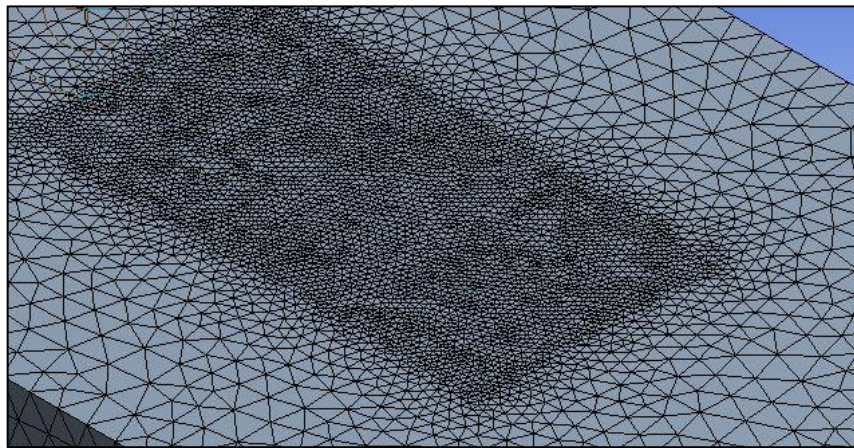


Figura 3.9. Vista de las diferentes mallas en la misma superficie

El aire que está en contacto con estas superficies fue modelado como un cubo hueco que cubre todas las superficies del sub-sistema. Para el mallado de este cubo, las superficies que hacen contacto con las de los demás dominios, tienen un mismo tamaño de malla. Sin embargo las caras alejadas tienen un tamaño de malla más grande (de hasta 10 mm), dado que el efecto principal ocurrirá en las superficies cercanas, esto se puede observar en la figura 3.10 y 3.11.

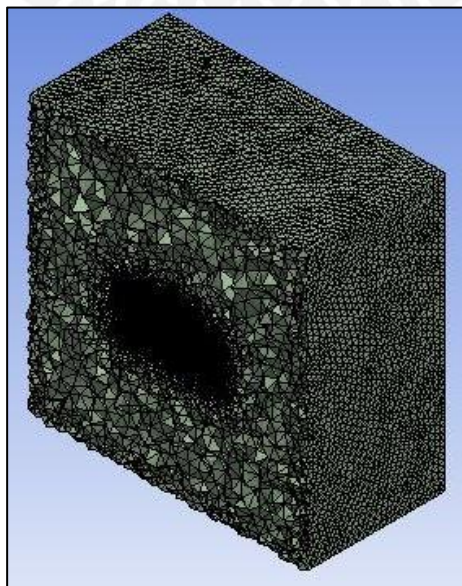


Figura 3.10. Vista de corte de la malla del volumen aire

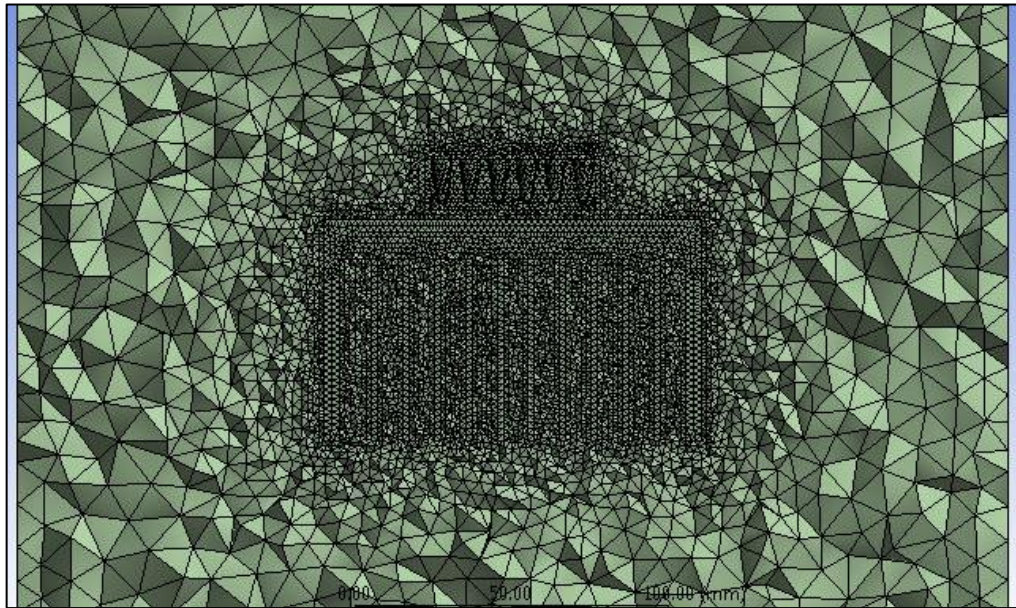


Figura 3.11. Vista de interior de la malla del aire

Finalizado el mallado en todos los dominios, se obtuvo un total de 642 766 elementos. Además las estadísticas del mallado se muestran en la figura 3.12., en los cuales se muestra que para ambos dominios y el dominio global los índices de ratio de aspecto, oblicuidad y ortogonalidad promedio son correctos para la simulación.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
Aire	42.9	ok		39	!		8	OK	
Bandeja	37.6	ok		24	!		6	OK	
Disipador	41.2	ok		12	ok		8	OK	
Global	37.6	ok		39	!		8	OK	
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
Aire	0	<1	100	<1	1	99	0	0	100
Bandeja	0	<1	100	<1	2	98	0	0	100
Disipador	0	<1	100	0	1	99	0	0	100
Global	0	<1	100	<1	1	99	0	0	100

Figura 3.12. Estadísticas de mallado en el sub-sistema

3.3.4 Ajuste de parámetros de control de simulación

El esquema del proyecto para esta simulación fue basado en la metodología de la tabla 3.1. Se importó la geometría y se procedió al mallado de cada dominio independientemente, como Bandeja, Disipador y Aire.

La estructura del proyecto quedó esquematizada como se aprecia en la figura 3.13.

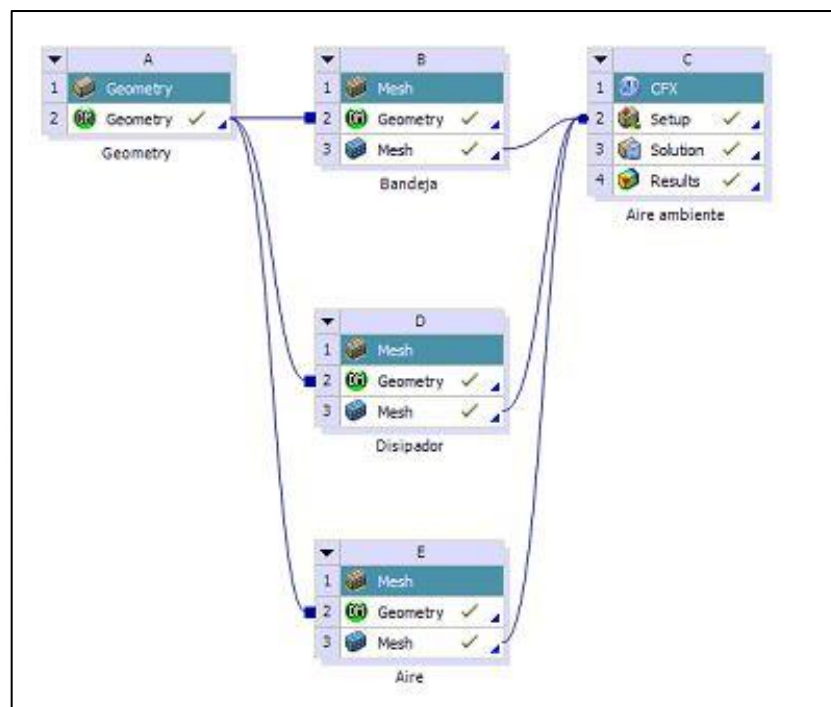


Figura 3.13. Esquema de proyecto de la simulación del sub-sistema

Los parámetros de control de la simulación son los que determinan el tipo de modelamiento, el alcance que tendrá la simulación y el grado de precisión del cálculo, dependiendo de las variables ingresadas, tal lo especificado en la tabla 3.1.

Para esta simulación se colocó las variables del tipo de análisis, mostrado en la figura 3.14. Cabe resaltar que el tipo de análisis será el mismo para todos los subsistemas, es decir de un solo ciclo de la PCR, dado que realizarlo para más ciclos, complicaría la simulación y el tiempo de respuesta de la misma.

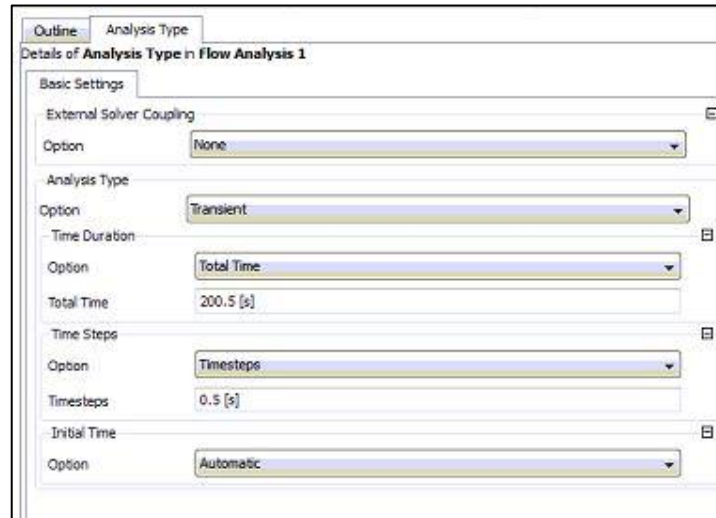
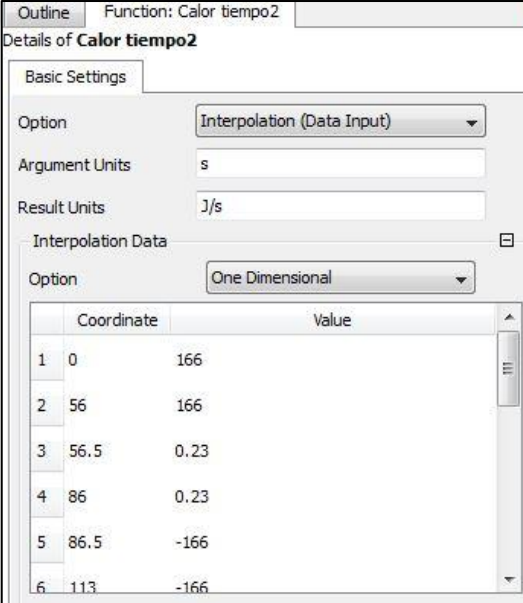


Figura 3.14. Tipo de análisis de la simulación

Siguiendo los pasos de la tabla 3.1., se crearon los dominios de Bandeja, Disipador, Aire, para que en ellos se inserten las condiciones de borde especificadas en el punto 15 de dicha tabla. Estas condiciones de borde pueden apreciarse en la figura 3.16. como: Pared Aire, Calor_Peltier1 y Calor_Peltier2. Luego, se procede a insertar las interfaces entre los dominios que están en contacto, para este caso, Aire_Bandeja y Aire_Disipador, ambas con el tipo “Fluid Solid”.

Se creó una expresión de flujo de calor entregado por los Peltiers, a través de los calores calculados analíticamente en la tabla 2.4.



Function: Calor tiempo2

Details of Calor tiempo2

Basic Settings

Option: Interpolation (Data Input)

Argument Units: s

Result Units: J/s

Interpolation Data

Option: One Dimensional

	Coordinate	Value
1	0	166
2	56	166
3	56.5	0.23
4	86	0.23
5	86.5	-166
6	113	-166

Figura 3.15. Función de calor vs. tiempo

Debido a que el problema relaciona la interacción de un fluido (aire) con los sólidos del sub-sistema, se analizaron según sus respectivas propiedades, las cuales son descritas a continuación:

Tabla 3.2. Propiedades del aire

Grupo del material	Sustancia Pura
Estado termodinámico	Gaseoso
PROPIEDADES	
Densidad	1.185 [kg/m ³]
Masa Molar	28.96 [kg/kmol]
Viscosidad dinámica	1.831E-05 [kg/m*s]
REFERENCIA	
Presión	1 [atm]
Temperatura	25 [C]

Tabla 3.3. Propiedades de la plata

Estado termodinámico	Sólido
PROPIEDADES	
Densidad	11000 [kg/m ³]
Masa Molar	107.87 [kg/kmol]
Conductividad térmica	420 [W/mK]
Capacidad calorífica	230 [J/kg K]
REFERENCIA	
Presión	1 [atm]
Temperatura	25 [C]

Tabla 3.4. Propiedades del aluminio AW 6060

Estado termodinámico	Sólido
PROPIEDADES	
Densidad	2702 [kg/m ³]
Masa Molar	26.98 [kg/kmol]
Conductividad térmica	237 [W/mK]
Capacidad calorífica	903 [J/kg K]
REFERENCIA	
Presión	1 [atm]
Temperatura	25 [C]

El árbol de operaciones realizadas se puede apreciar en la figura 3.16., en el cual se toma en consideración lo mencionado en el párrafo anterior, además de los parámetros para el “Solver Control” y “Output Control”.

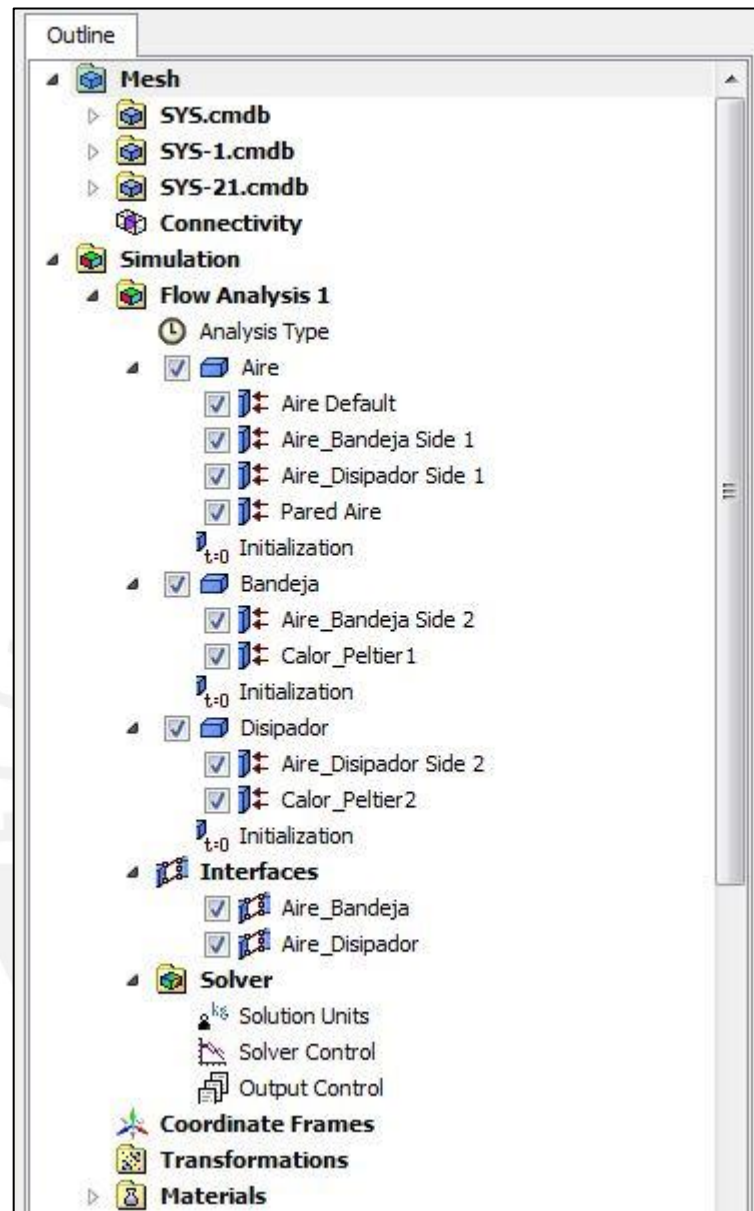


Figura 3.16.Árbol de operaciones para la simulación del sub-sistema

Una vez ingresados todos los parámetros de evaluación se observa cómo se crea el modelo en la interface de ANSYS.

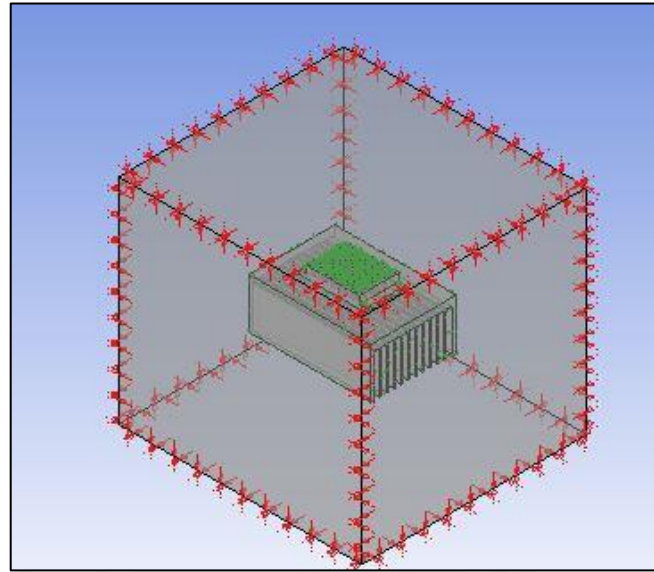


Figura 3.17. Modelo para simulación del primer sub-sistema

Se procede a iniciar la solución del modelo a analizar. El solucionador detecta los parámetros de de los dominios y las interfaces tal lo muestra la figura 3.18.

Global Statistics :	
Global Number of Nodes	= 642766
Global Number of Elements	= 3358236
Total Number of Tetrahedrons	= 3358236
Global Number of Faces	= 331430
Domain Interface Name : Aire_Bandeja	
Discretization type	= GGI
Intersection type	= Partitioner
Non-overlap area fraction on side 1	= 3.72E-02
Non-overlap area fraction on side 2	= 3.92E-02
Domain Interface Name : Aire_Disipador	
Discretization type	= GGI
Intersection type	= Partitioner
Non-overlap area fraction on side 1	= 2.87E-02
Non-overlap area fraction on side 2	= 2.69E-02

Figura 3.18. Parámetros identificados por el solucionador

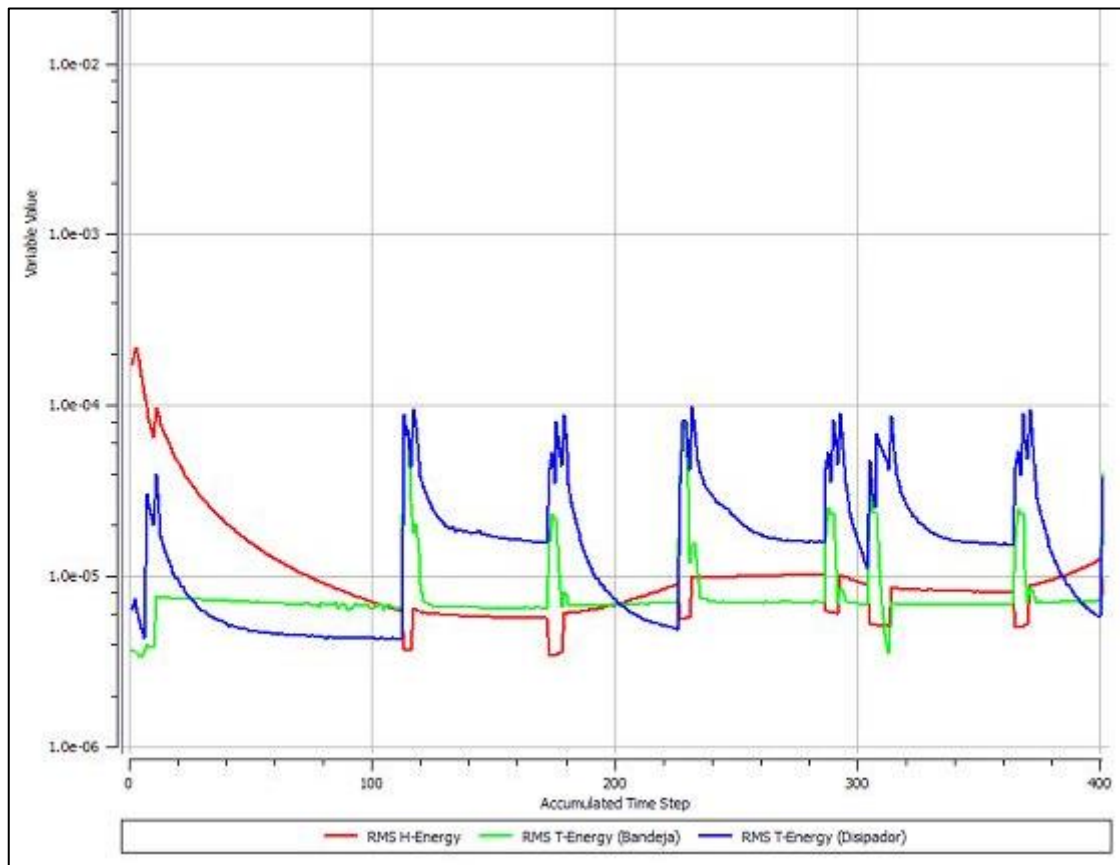
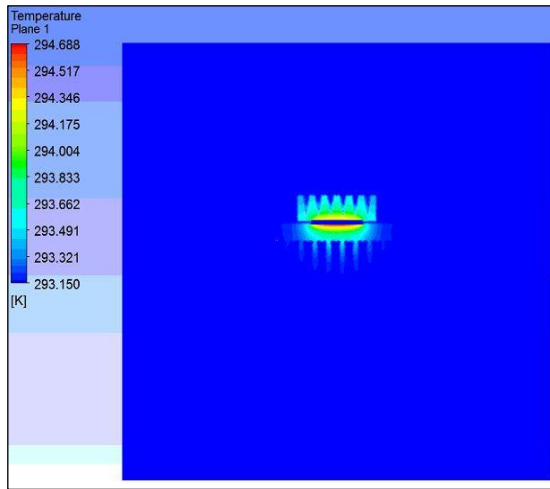


Figura 3.19. Curva de transferencia de calor de ANSYS-Solver para el sub-sistema analizado

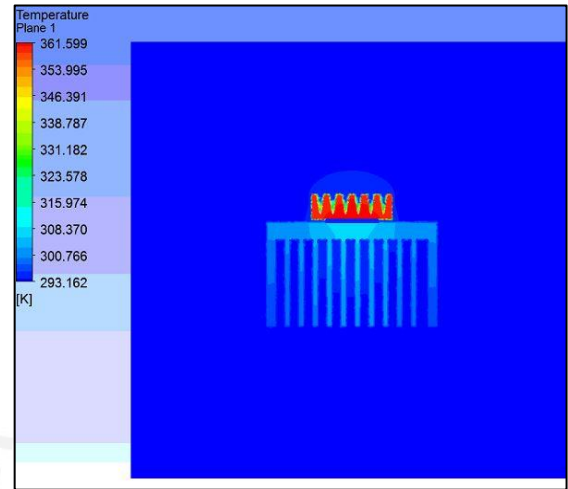
3.3.5 Evaluación de resultados de la simulación

Luego de que el ANSYS Solver haya terminado, se procede a la evaluación de resultados mediante la ubicación de un plano de referencia en YZ, para seleccionar la variable de interés, en este caso temperatura.

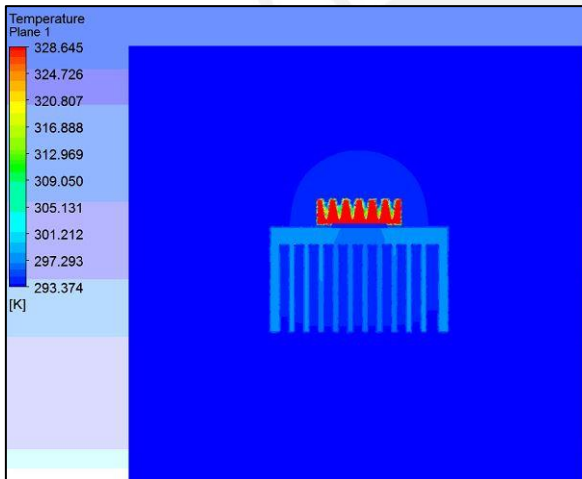
Se muestran los resultados en las figuras 3.20 hasta 3.27 para los instantes en los que ocurre la variación de flujo de calor mediante el control del Peltier, para lograr las temperaturas del proceso. Estos instantes están reflejados en la tabla 2.4.



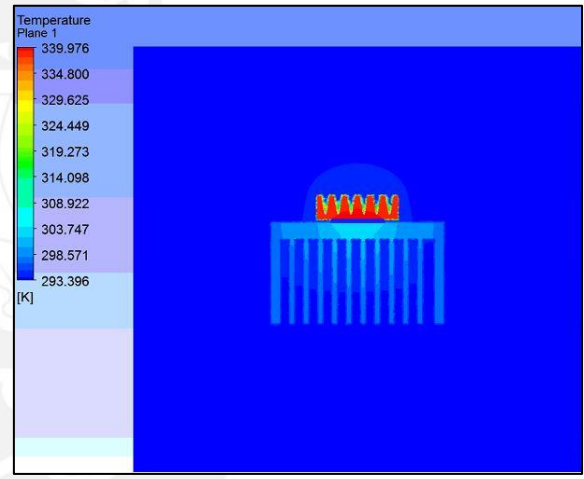
a. Temperaturas para 0 s



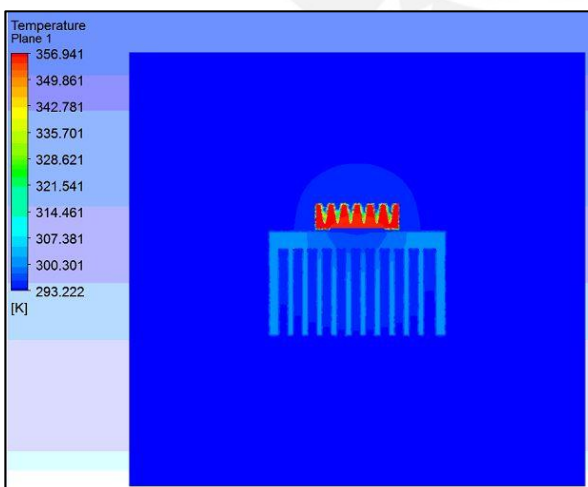
b. Temperaturas para 56 s



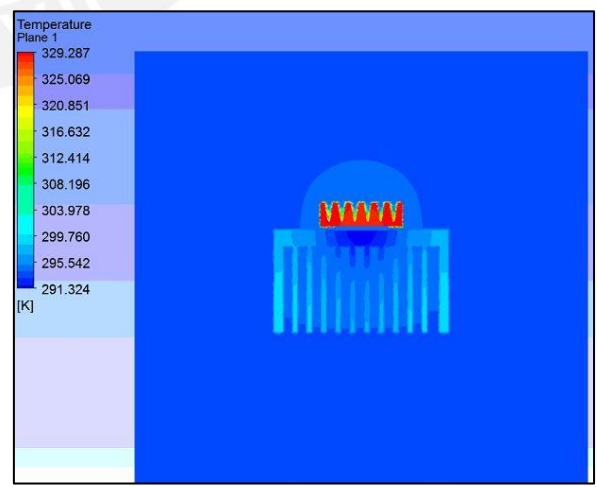
c. Temperaturas para 86 s



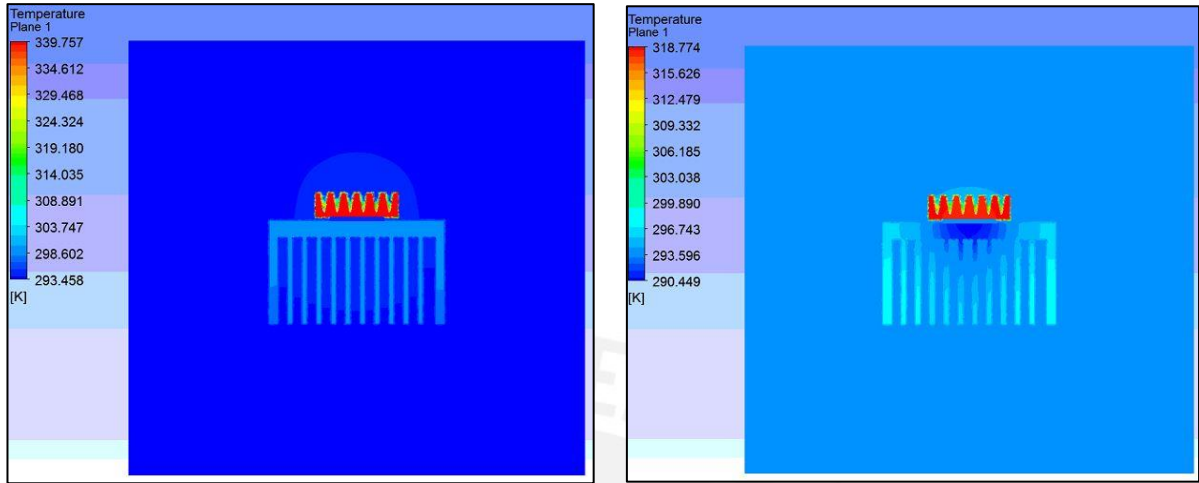
d. Temperaturas para 113 s



e. Temperaturas para 143 s



f. Temperaturas para 152 s



g. Temperaturas para 182 s

h. Temperaturas para 200 s

Figura 3.20. Resultados de temperaturas del sistema global para diversos instantes de tiempo

De los resultados obtenidos podemos resumir las temperaturas aproximadas obtenidas en la bandeja (específicamente en las caras coincidentes a las probetas contenidas con las muestras) para todos los instantes de tiempo:

Tabla 3.5. Temperaturas en la Bandeja Portamuestras

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Temperatura ideal (°C)
0	20	20
56	87	95
86	83	95
113	56	60
143	55	60
152	68	72
182	66	72
200	45	25

Según estos resultados se puede observar que hay una diferencia de temperaturas con respecto a las ideales para realizar la PCR, con una variación máxima de 8°C.

Dado que la variación de temperatura es mayor a la esperada, se harán nuevas simulaciones hasta aproximar los valores de temperatura a las temperaturas ideales de cada etapa, mediante la aplicación de mayor calor de los Peltier. La variación de temperatura no deberá ser mayor a 2°C , con lo cual se logra un ciclo térmico más preciso.

El gráfico 3.21. nos muestra la curva de calor por unidad de área para los instantes de tiempo del ciclo térmico.

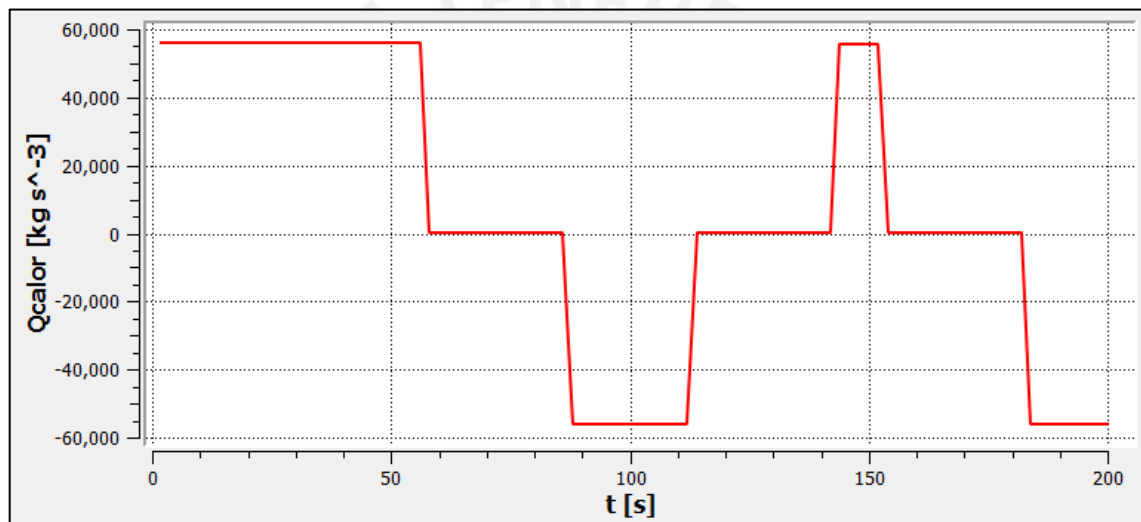


Figura 3.21. Resultados de calor para diversos instantes de tiempo

Finalmente con estos valores, se realizó una nueva simulación en la cual se obtuvo resultados de la tabla 3.6., los cuales son más aproximados y con una variación máxima de 2°C respecto a las temperaturas ideales, con lo cual se logra una mayor eficiencia del termociclador.

El máximo valor de calor es de aproximadamente 180 W, por lo cual cada Peltier deberá suministrar 90 W, que está dentro del rango de operación del mismo.

Tabla 3.6. Valores calor hallados para cada etapa del ciclo

Etapa	Calor (W)	Temperatura ideal (°C)	Temperatura (°C)
1	179	4 - 95	94
2	0.53	95	94
3	179	95 - 60	93
4	1.32	60	58
5	178	60 - 72	58
6	1.32	72	72
7	180	72 - 95	94
8	179	72 - 25	72
9	2.3	25	25

3.4 Simulación del sistema módulo termo-mecánico

Esta simulación tendrá la misma geometría y modelos CAD descritos en la simulación anterior. Para realizar la simulación del sistema completo se han realizado simplificaciones, tales como:

- Dado que los Peltiers inyectan calor mediante el uso de la corriente y no se cuenta con la licencia para el módulo de ANSYS que pueda simular estos parámetros, se ha simplificado la acción de estos, mediante la aplicación de un flujo de calor de la cara caliente a la bandeja y de la cara fría al disipador.
- Se ha suprimido la geometría de los Peltiers de manera que quede un espacio hueco, para evitar la posible conducción de calor y que ellos afecte de manera negativa al proceso.
- El disipador seleccionado para la simulación presenta aletas corrugadas, las cuales dificultan el mallado y solución de la simulación. Por tal motivo, se ha esquematizado un disipador con las mismas dimensiones y propiedades pero con aletas lisas.

- El ventilador estará en funcionamiento durante todo el proceso, inclusive en las etapas de calentamiento. Esto es porque se trata de demostrar que el flujo de aire ayuda a la transferencia de calor.
- El ventilador se ha colocado a 30 mm del disipador. Esta asunción se ha dado, ya que al aumentar la distancia entre ambos ayuda a eliminar el punto muerto que se crea en el centro del ventilador. La magnitud ha sido tomada en cuenta sin que afecte a la presión de aire (mayores pérdidas).
- La tapa que debe cubrir las muestras ha sido esquematizada como una plancha simple, en la cual sobre el área de contacto con las probetas se inserta una función de calor para que se mantenga los 105°C durante el proceso.
- La carcasa ha sido esquematizada mediante un cubo, en el cual se le ha seleccionado las áreas de ingreso y salida de aire.

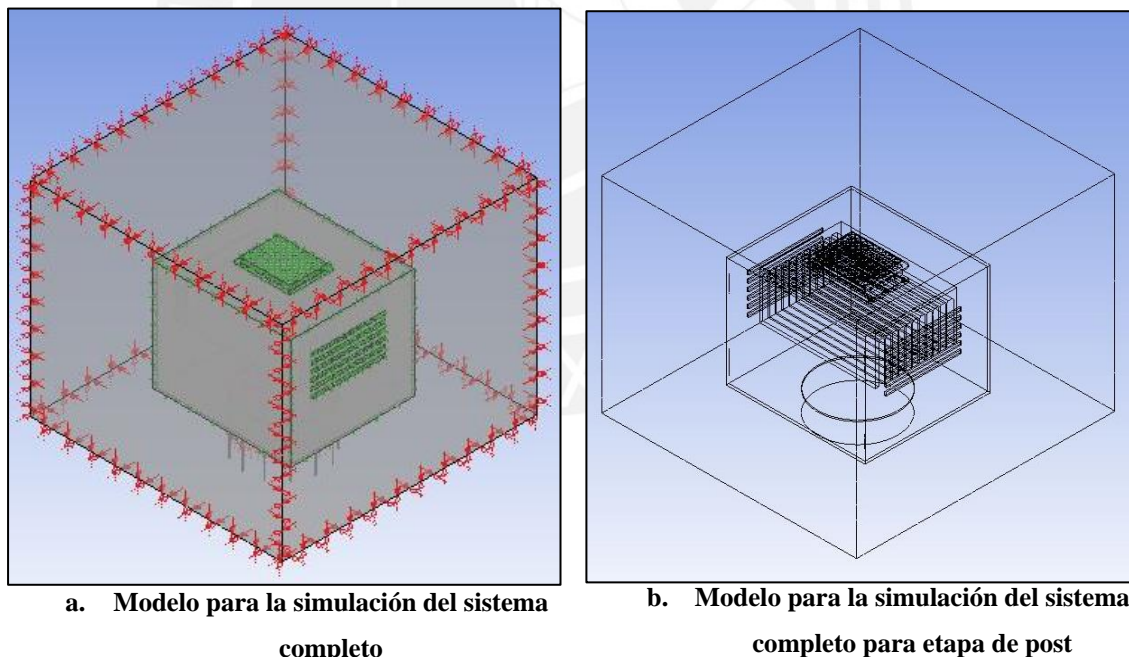


Figura 3.22. Esquema del sistema completo para la simulación

3.4.1 Estructura de la simulación

El esquema del proyecto para esta simulación fue basado en la metodología de la tabla 3.1. La geometría para esta simulación es la misma que la utilizada en la simulación

anterior, con la diferencia que se le añadió los sólidos de la tapa, la probeta y las muestras.

La estructura del proyecto quedó esquematizada como se aprecia en la figura 3.28.

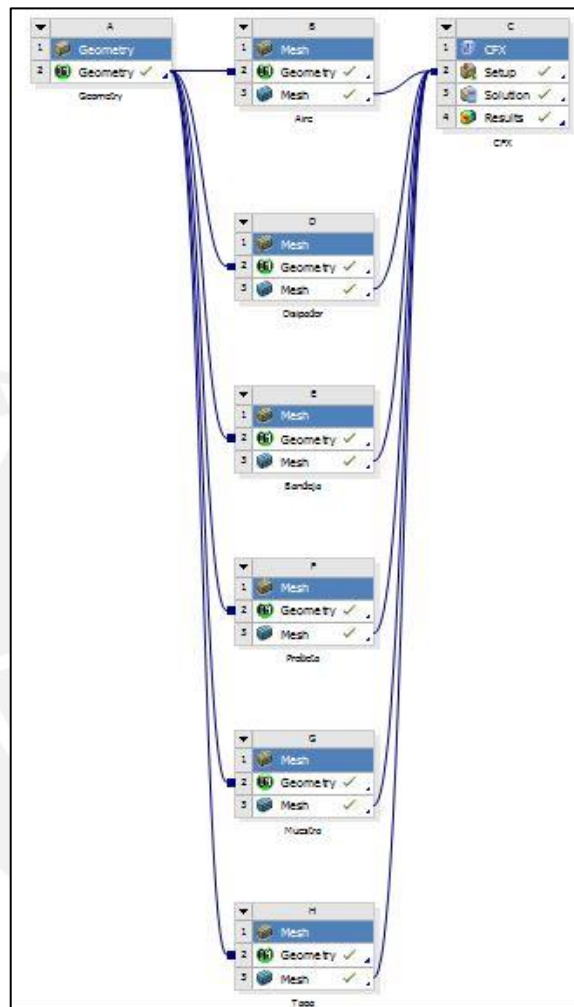


Figura 3.23. Estructura de la simulación del conjunto completo

Los dominios para esta simulación son:

Aire, Disipador, Bandeja, Probeta, Muestras y Tapa.

Las interfaces identificadas para la conexión entre los dominios son:

- Aire_Bandeja
- Aire_Disipador
- Aire_Probeta
- Muestras_Tapa
- Bandeja_Probeta
- Probeta_Muestras

- Aire_Tapa

- Probeta_Tapa

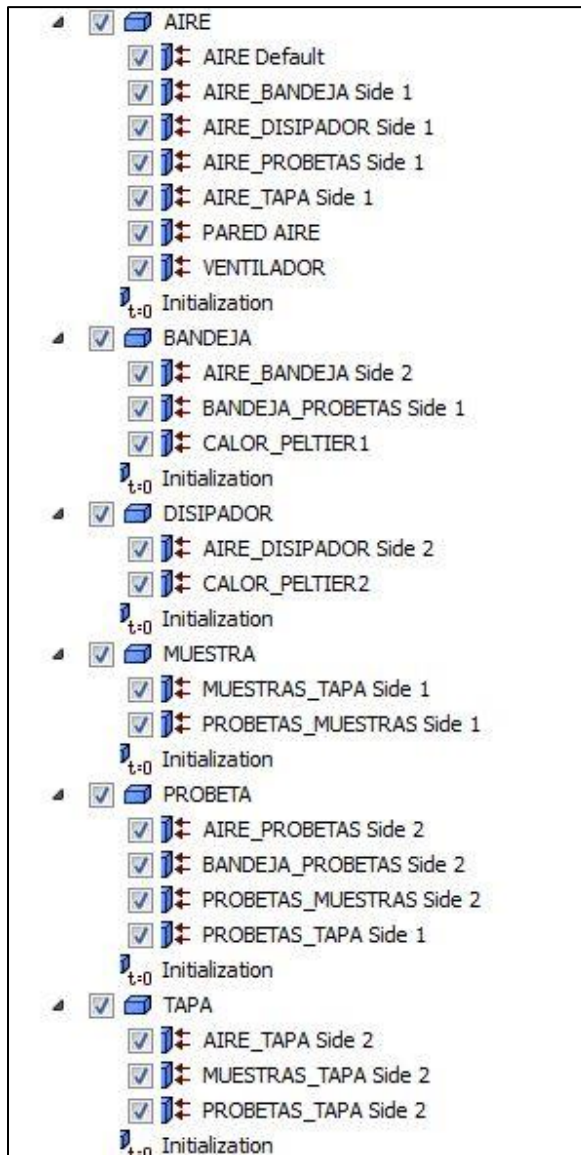


Figura 3.24. Dominio de la simulación

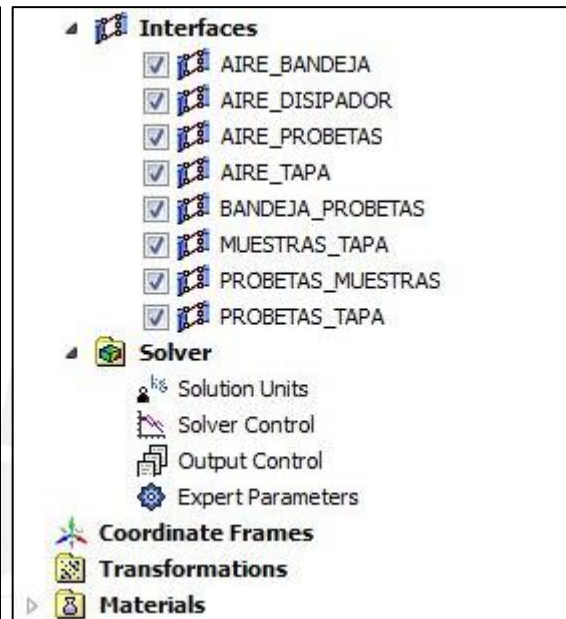


Figura 3.25. Interfaces de la simulación

El ingreso de las variables para esta simulación es similar al de la simulación anterior. Una vez ingresado todos los parámetros, procedemos a iniciar el CFX-Solver, en el cual nos arroja las estadísticas de mallado y las estadísticas globales del sistema, es decir la cantidad total de elementos y nodos.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
AIRE	46.2 ok			12 ok			6 OK		
MUESTRA	42.3 ok			322 !			6 OK		
BANDEJA	37.0 ok			38 !			6 OK		
DISIPADOR	39.6 ok			14 ok			10 OK		
PROBETA	29.4 ok			80 !			12 OK		
TAPA	44.1 ok			11 ok			12 OK		
Global	29.4 ok			322 !			12 OK		
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
AIRE	0	<1	100	0	1	99	0	0	100
MUESTRA	0	1	99	1	22	77	0	0	100
BANDEJA	0	<1	100	<1	5	95	0	0	100
DISIPADOR	0	<1	100	0	2	98	0	0	100
PROBETA	0	1	99	1	3	96	0	0	100
TAPA	0	<1	100	0	5	95	0	0	100
Global	0	<1	100	<1	3	97	0	0	100

Figura 3.26. Estadísticas de mallado del sistema completo

Global Statistics :		
Global Number of Nodes	=	427470
Global Number of Elements	=	1972984
Total Number of Tetrahedrons	=	1972984
Global Number of Faces	=	385142

Figura 3.27. Estadísticas del sistema global

Una vez que el CFX-Solver haya procesado toda la información introducida, obtenemos los resultados en los dos gráficos más importantes para este tipo de simulación: Momento y masa y transferencia de calor.

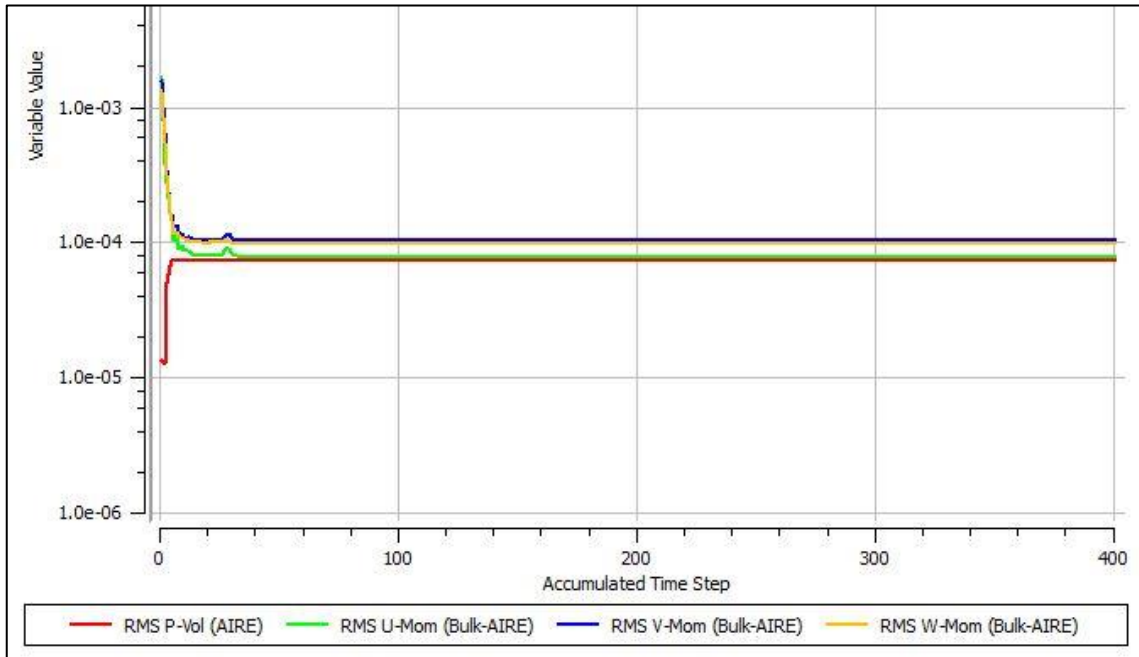


Figura 3.28. Curva de momento y masa para el sistema completo

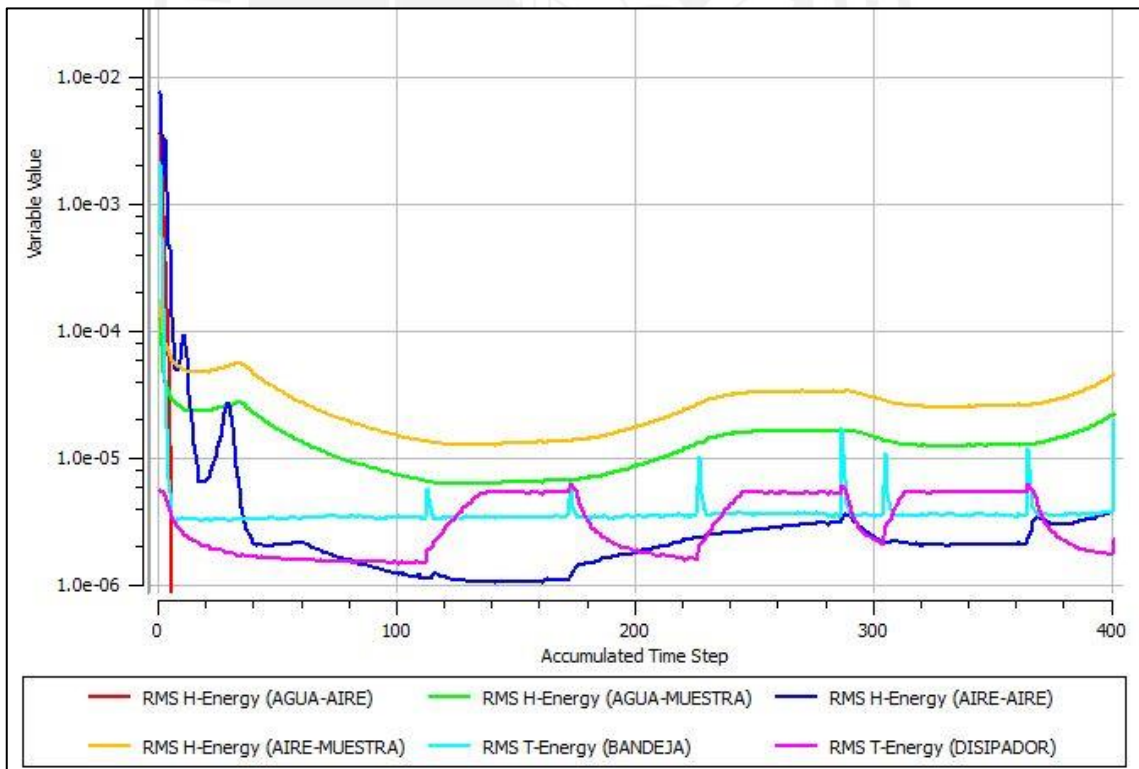


Figura 3.29. Curva de transferencia de calor para el sistema completo

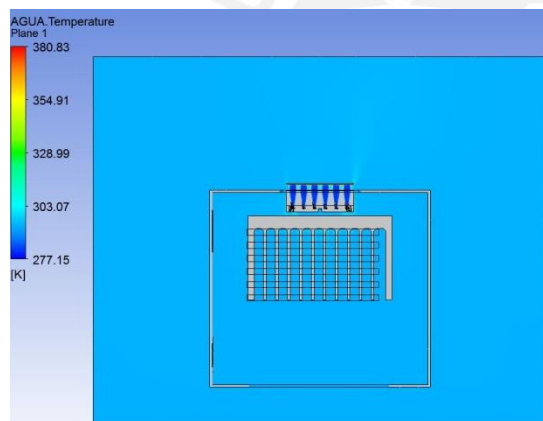
3.4.2 Evaluación de resultados de la simulación

Luego de que el ANSYS Solver haya terminado, se procede a la evaluación de resultados mediante el mismo método utilizado en la simulación anterior.

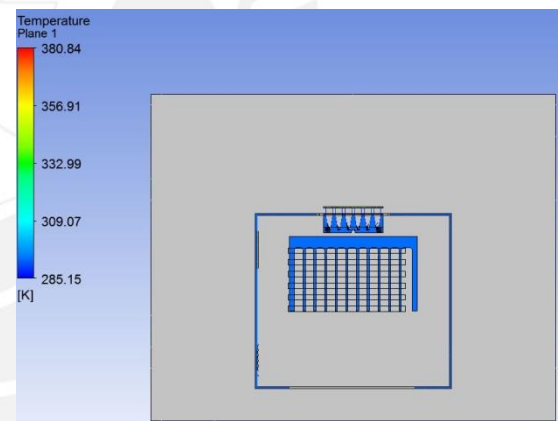
La variable de interés seguirá siendo el comportamiento de la temperatura a través del paso del tiempo.

En este caso, dado que la simulación fue realizada para fluidos multifásicos, el software contempla la evaluación de la temperatura en tres dominios: Global, Aire y Agua.

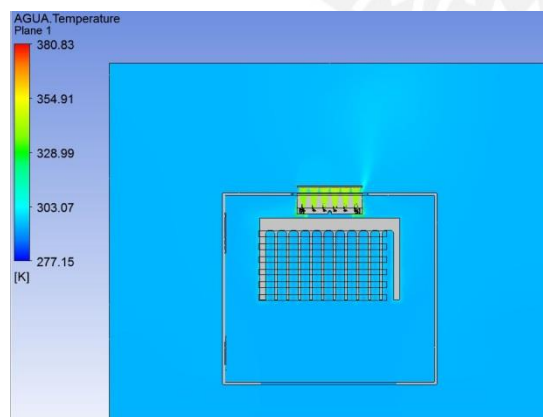
Los resultados serán presentados para los instantes relevantes, con el dominio global y del agua (muestras).



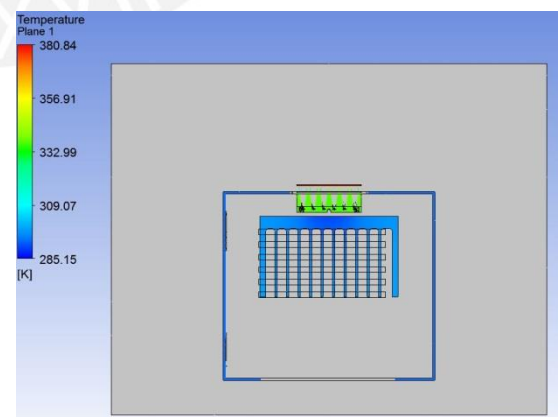
a. Temperatura de fluidos (0 s)



b. Temperatura para sistema global (0 s)



c. Temperatura de fluidos (86 s)



d. Temperatura para sistema global (86 s)

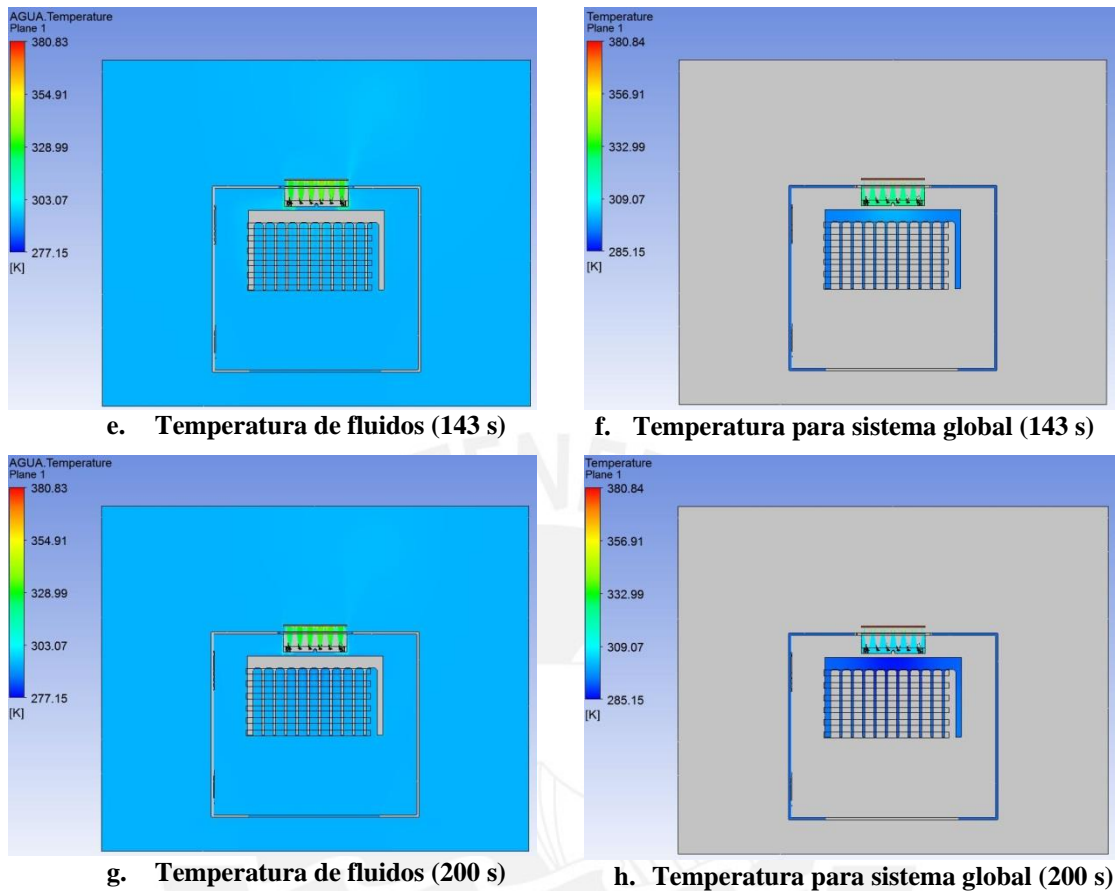


Figura 3.30. Desarrollo de temperaturas del sistema para el análisis transiente

Mediante el análisis de todas las temperaturas se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 3.7. Temperaturas en las muestras

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Temperatura ideal (°C)
0	4	4
56	89	95
86	92	95
113	56	60
143	55	60
152	72	72
182	70	72
200	29	25

Las temperaturas encontradas, son más exactas que las temperaturas de la anterior simulación. Los elementos agregados, tales como la tapa y la carcasa fundamentan los nuevos valores, y es así como se aprecia la importancia de su uso.



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE COSTOS Y RECOMENDACIONES PARA LA FABRICACIÓN

4.1 Introducción

En el presente capítulo se realiza la evaluación de costos de un nuevo conjunto, tomando como partida que ya existe un prototipo y elementos que pueden ser reutilizados, tales como la bandeja, células Peltier, entre otros, que serán especificados posteriormente.

Los componentes principalmente afectados y en los cuales se debe invertir más, son la tapa y la carcasa, dado que como fue analizado en el capítulo anterior, la influencia de ellos sobre el conjunto es vital para que se logre correctamente la PCR sin muchas variaciones.

Además dado el nuevo diseño propuesto, se realizan recomendaciones para su posterior fabricación.

Cabe resaltar que estas recomendaciones estarán limitadas a la parte electrónica que debe ir acoplada al módulo termo-mecánico, dado que el control sobre las células Peltier es sumamente importante para el desarrollo correcto de la PCR.

4.2 Costo total de fabricación del módulo termo-mecánico

Se estimará el costo total de fabricación de un nuevo módulo termo-mecánico con las especificaciones dadas a lo largo del capítulo 2. Para determinar el costo general del sistema, se dividió este en sub-sistemas, los cuales fueron evaluados detalladamente y además se consideró la mano de obra tanto para la instalación como también la de diseño.

Los sub-sistemas serán:

- Tapa
- Carcasa
- Componentes varios
- Mano de obra de fabricación
- Mano de obra de diseño

4.2.1 Tapa

Está compuesto por los nuevos componentes agregados a la tapa, se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Costos de sub-sistema tapa

Cant.	Descripción	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
1	Plancha metálica ASTM A 304 400 mm x 400mm x 2mm	60.00	60.00
1	Aislante e=40 mm, L=1200 mm	35.00	35.00
2	Resistencias Kapton	78.40	156.80
10	Tornillos hexagonales ISO4762 – M4x20	0.25	2.50
10	Arandelas de caucho	1.00	10.00
10	Tuercas C304	5.00	50.00
10	Aislantes para tornillo	1.50	15.00
2	Bisagras	10.00	20.00
Costo total			349.30

4.2.2 Sub-sistema carcasa

En este sub-sistema se tiene en cuenta los elementos correspondientes a la nueva carcasa y la mano de obra indirecta para la fabricación de la carcasa.

Tabla 4.2. Costos de sub-sistema carcasa

Cant.	Descripción	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
1	Plancha metálica ASTM A 304 800mm x 400mm x 2mm	120.00	120.00
1	Acrílico	5.00	5.00
4	Patas de soporte	1.00	4.00
10	Tornillos hexagonales C304 ISO 4018 M5x40	5.00	50.00
10	Arandelas C304 ISO 7091 M5	2.50	25.00
10	Tuercas C304 ISO 4032 M5	5.00	50.00
1	Rejilla para ingreso de aire al ventilador	12.00	12.00
1	Sachet grasa térmica	8.00	8.00
Costo total			274.00

4.2.3 Sub-sistema componentes varios

Algunos de estos componentes ya se encuentran disponibles del prototipo anterior. Sin embargo hace falta un nuevo disipador con las características especificadas para el correcto funcionamiento.

Este tipo de disipador puede ser fabricado localmente por una empresa metal mecánica.

Tabla 4.3. Costos de componentes varios

Cant.	Descripción	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
2	Células Peltier	100.00	200.00
1	Bandeja Portamuestras 48 agujeros	984.50	984.50
1	Probetas 48 x 0.2 ml	45.00	45.00
1	Disipador de calor 170x120x70 mm	120.00	120.00
1	Ventilador	30.00	30.00
Costo total			1379.50

4.2.4 Mano de obra

Se detalla el costo de mano de obra del armado y ensamblaje de todo el conjunto, así como también el costo del diseño.

Tabla 4.4. Costos de mano de obra

Cant.	Descripción	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
16 h	Horas-Hombre por 1 trabajador	20.00	320.00
300 h	Costo por ingeniería de detalle	30.00	9000.00
Costo total			9320.00

4.2.5 Resumen de costos totales

Según los costos evaluados en los sub-sistemas se puede obtener el costo total de fabricación de un nuevo módulo termo-mecánico.

Tabla 4.5. Resumen de costos totales

Cant.	Descripción	Precio Unitario (S/.)
1	Costo sub-sistema tapa	349.30
1	Costo sub-sistema carcasa	274.00
1	Costo sub-sistema componentes	1379.50
1	Costo mano de obra	9320.00
		11 322.80

Cabe resaltar que el elevado precio es por la fabricación de un primer prototipo. Se tendrá que considerar que el costo por ingeniería es único, lo cual disminuirá el costo de fabricación en serie.

4.3 Recomendaciones para la fabricación

Para la realización de la fabricación se establecerán ciertos pasos recomendados, los cuales son:

1. El ventilador debe ir conectado mediante tornillos a la cara inferior de la carcasa, siendo concéntrica con el agujero de ingreso de aire. El sentido de flujo de aire es ingresando al disipador.
2. El aislante de la carcasa debe ser colocado de tal manera que coincida con el área proyectada de la bandeja. Se aplica un pegamento entre la plancha de la bandeja y el aislamiento para su fijación.
3. La bandeja portamuestras debe ser unida al disipador mediante uniones atornilladas, siendo coincidentes en su centro.
4. El disipador va colocado 30 mm superior al ventilador, siendo sujetado de unas pestañas a las caras laterales de la carcasa.
5. Entre el disipador y la bandeja, deberán ir colocados los Peltiers los cuales se fijan con una pasta térmica y los cables de los mismos deben ir por la ranura posterior de la carcasa.
6. Se coloca un acrílico por encima de la bandeja para la protección de la misma.
7. Se atornilla la plancha posterior a la carcasa.
8. El ensamblaje de la tapa debe colocarse una plancha inferior, la cual va conectada a un jebe para el acople con la carcasa,
9. Las bisagras deben ser atornilladas a la carcasa y a la tapa.
10. Se debe colocar las resistencias eléctricas sobre la plancha de la tapa, haciendo contacto directo con esta. Los cables de estas resistencias, irán por la ranura posterior de la carcasa.
11. Se colocará un aislante por encima de las resistencias eléctricas, el cual tiene un perfil para que encaje directamente.
12. Se coloca el “chasis” de la tapa sobre todo el conjunto, para luego atornillarlo a la tapa exterior, con las uniones atornilladas aislantes.

CONCLUSIONES

- Este trabajo ha sido desarrollado tomando como punto de partida un diseño previo y su correspondiente prototipo, los cuales no cumplían con todas las exigencias necesarias para realizar de manera adecuada la PCR. Mediante la revisión de los trabajos previos y de los resultados alcanzados con el prototipo, se pudieron identificar los elementos del módulo termo-mecánico que afectan en mayor medida el correcto funcionamiento de dicho prototipo, estos son: la tapa, la carcasa, el disipador y el aislamiento térmico. Por tanto, fue sobre estos elementos que se realizaron las propuestas de mejora. De igual forma se identificaron los componentes que pueden ser reutilizados en la posterior fabricación de un nuevo prototipo, estos son: la bandeja portamuestras, las células peltier y el ventilador.
- Se propuso un nuevo diseño para la tapa, la cual debe mantener una temperatura de contacto con las muestras de 105°C. Para lograrlo se incluyó el uso de dos resistencias eléctricas, comercializadas por la empresa Minco Heaters, con capacidad de 210 Ω cada una, entregando una potencia total de 137 W, la cual es superior a la potencia requerida de 75 W. Estas resistencias evitan la condensación de los vapores que se producen en las cavidades de las probetas y contribuyen a que las muestras alcancen la temperatura deseada, aspecto que fue comprobado mediante las herramientas de simulación por computadora.
- Se propuso un nuevo diseño para la carcasa, más compacto y más eficiente, haciendo un uso adecuado del aislamiento térmico para disminuir las pérdidas consideradas en la evacuación de calor para las etapas de calentamiento del ciclo. Como aislante térmico se utilizó poliuretano, que tiene una conductividad térmica 0.19 W/mK, la cual es mayor a la solicitada mediante cálculos analíticos. Dicho aislante es colocado en todo el contorno de la bandeja. El nuevo diseño de la carcasa fue comprobado mediante simulación por computadora, obteniéndose resultados satisfactorios.

- El disipador utilizado en el prototipo deberá ser cambiado por uno que tenga una mayor capacidad para evacuar el calor. En su lugar se propone adquirir un disipador del modelo 8586 y de la categoría Extruded, comercializado por la empresa Pada Engineering. Colocando el disipador propuesto a una separación de 30 mm del ventilador se logra un flujo de aire más uniforme y se elimina el punto muerto que se crea en el centro del ventilador. Estos aspectos fueron verificados mediante simulación por computadora.
- Las propuestas de mejora del diseño efectuadas al módulo termo-mecánico, conjuntamente con los cálculos analíticos y las simulaciones por computadora, permiten afirmar que un nuevo prototipo construido con dichas mejoras realizará un adecuado proceso de PCR. El nuevo prototipo alcanzará rampas de temperatura de 1.3 °C/s como promedio, pudiendo ser ligeramente superiores dependiendo del control electrónico que se acople al módulo termo-mecánico. Para alcanzar estas rampas de temperatura cada una de las dos células peltier utilizadas en el equipo, con capacidad de 100 W, deberá aportar un máximo de 90 W de potencial calórico, obteniéndose variaciones de 2°C de temperatura con respecto a las temperaturas ideales. De esta manera la uniformidad térmica que podrá alcanzar el nuevo prototipo es comparable con la alcanzada por los equipos comerciales.
- Se determinaron los costos de los componentes para realizar la fabricación de un nuevo prototipo con el diseño mejorado, los cuales ascienden a la suma de S/.11322.80. Además, se propuso un procedimiento con algunas recomendaciones para el correcto ensamblaje del módulo termo-mecánico, considerando las mejoras desarrolladas. Una de las recomendaciones más importantes es el uso de acero inoxidable ASTM A304 para la construcción de la tapa y de la carcasa, así como de tornillos de acero inoxidable del mismo material, para las uniones roscadas, dadas las aplicaciones que podría tener el equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kary Banks Mullis, François Ferré, Richard A. Gibbs, *The Polymerase Chain Reaction*, Birkhäuser, 1994
- [2] J. L. Ponce y D. Zegarra, *Diseño e implementación de un módulo para procesos de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) en la replicación de ADN*, Lima: PUCP, 2012.
- [3] O. Piminchumo, *Diseño de los componentes mecánicos de un termociclador utilizando el método de los elementos finitos*, Lima: PUCP, 2009.
- [4] R. Franco, Q. Valverde, J. Acosta, S. Mujica y W. Carrera, «Simulación y análisis térmico de un prototipo de porta muestras para un termociclador para uso en ingeniería y biología molecular,» de *8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA*, Cusco, 2007.
- [5] MJ. Research (2004), *DNA Engine and DNA Engine Tetrad Peltier Termal Cyclers Operations Manual*, version 4.0, USA.
- [6] MJ Research (2000), *Product Catalog*, USA.
- [7] TE Technology, Inc., “High-Temperature Modules”, Consulta: 25 de marzo del 2014.
- [8] <http://www.tetech.com/Peltier-Thermoelectric-Cooler-Modules/High-Temperature.html>
- [9] Heikes, Robert R. (1961), *Thermoelectricity: science and engineering*, Interscience, USA.
- [10] MacDonald, D. K. C. (1962), *Thermoelectricity: an introduction to the principles*, Wiley, USA.
- [11] Hardside, “Células peltier”. Consulta: 18 de febrero del 2014
< <http://www.hardside.com.ar/utills/peltier.htm>>
Departamento de máquinas y motores térmicos, Universidad del País Vasco (2001-2009), “Peltier”. Consulta: 20 de febrero del 2014.
<<http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/PELTIER.htm>>
- [12] Pérez De Castro, AM. (2011). *Reacción en cadena de la polimerasa (Polymerase Chain Reaction, PCR)*.

- [13] Carlos Platero, Luis Castedo, Manuel Ferre, Carlos Vicente , Control clásico y moderno sobre células Peltier en un entorno didáctico, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial (UPM), Madrid.
- [14] MacDonald, D. K. C. (1962), Thermoelectricity: an introduction to the principles, Wiley, USA.
- [15] Supercool, “Thermoelectric Solutions” (2004). Consulta: 15 de marzo de 2014.
<http://www.supercool.se/archive/pdf_downloads/TEA.pdf>
- [16] Pada Engineering, “Extruded Heat Sinks”. Consulta: 14 de marzo de 2014.
<http://www.padaengineering.com/pdf/cat_extruded.pdf>
- [17] Pontificia Universidad Católica del Perú (2010), *Separatas del curso de Transferencia de Calor*, Lima.
- [18] MARION, Alliet-Gaubert , "CFD analysis of industrial multi-staged stirred vessel"
- [19] Chakib Alaoui, Ziyad M. Salameh, Solid State Heater Cooler: Design and Evaluation, Department of Electrical and Computer engineering, University of Massachusetts at Lowell Massachusetts, USA.
- [20] O. C. Zienkiewics, R. L. Taylor. (1995), El Método de los elementos Finitos, Volumen 2. 4ta edición. Mc Graw Hill. España.