

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



ESTUDIO EXPERIMENTAL Y DE MODELADO DE LA
REFRIGERACIÓN LÍQUIDA EN CONTROLADOR DE
VEHÍCULO ELÉCTRICO

POR:

DANIEL DUARTE REZA

TESIS

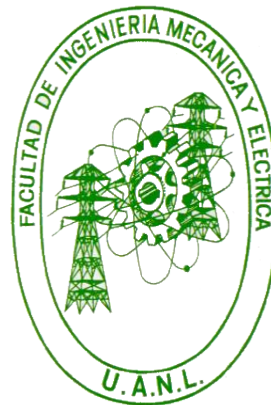
EN OPCIÓN AL GRADO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA

AGOSTO DE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



ESTUDIO EXPERIMENTAL Y DE MODELADO DE LA
REFRIGERACIÓN LÍQUIDA EN CONTROLADOR DE
VEHÍCULO ELÉCTRICO

POR:

DANIEL DUARTE REZA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA

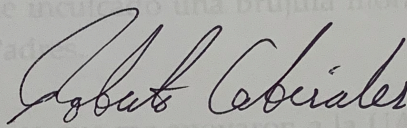
AGOSTO DE 2020

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **"ESTUDIO EXPERIMENTAL Y DE MODELADO DE LA REFRIGERACIÓN LÍQUIDA EN CONTROLADOR DE VEHÍCULO ELÉCTRICO"** realizada por el alumno **Daniel Duarte Reza**, matrícula 1720464, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Ingeniero Mecánico Electricista.

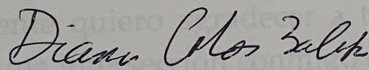
En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor por haberme invitado a este proyecto y brindarme su tiempo y conocimiento, así como su paciencia para responder mis dudas y sus ánimos para terminar el proyecto, muchas gracias, este es un logro de ambos.

El comité de Tesis:



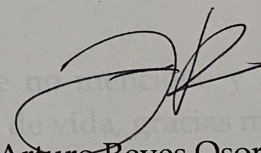
Dr. Roberto Carlos Cabriaes Gómez

Asesor



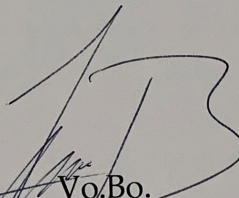
M.C. Diana Cobos Zaleta

Co Asesor



Dr. Luis Arturo Reyes Osorio

Co Asesor



Vo.Bo.

Dr. Fernando Banda Muñoz

Subdirección Académica

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor por haberme invitado a este proyecto y brindarme su tiempo y conocimiento, así como su paciencia para responder mis dudas y sus ánimos para terminar el proyecto, muchas gracias, este es un logro de ambos.

A mis padres por haberme inculcado una brújula moral la cual apunta en una buena dirección. Gracias Padres.

Agradezco a las instituciones que me apoyaron a la UANL, y a la FIME escuela que es parte de mi corazón.

Así mismo aprovecho para agradecer a nombre mio y de mi asesor a la Ing. Magda Gonzalez y al Centro de Innovación y Diseño de la Facultad de Arquitectura de la UANL por su apoyo para esta tesis.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que no mencione y hayan tenido una intersección conmigo debido a este proyecto de vida, gracias muchas gracias.

RESUMEN

Como consecuencia de la inestabilidad en el suministro y el alza frecuente en el precio de las gasolinas a nivel mundial, se han realizado esfuerzos para desarrollar vehículos eléctricos (EV) y vehículos híbridos (HEV) durante las últimas décadas.

El manejo del consumo de energía es crucial en el rango de autonomía que se puede obtener de un EV, y es el controlador de un EV el que funciona como un regulador que suministra la energía eléctrica al motor, así como también gestiona la velocidad del vehículo en la mayoría de los casos como un variador de frecuencia que recibe la señal de control de pedal de aceleración. Esta acción genera una cantidad significativa de calor debido a la resistencia interna del controlador. Para que un EV o un HEV funcione en condiciones óptimas, la temperatura del controlador debe mantenerse dentro de un cierto límite. Por lo tanto, se requiere de un sistema de enfriamiento para el controlador que sea eficiente y efectivo.

En este proyecto se realizó el diseño y fabricación de un intercambiador de calor tipo placa de refrigeración líquida para el EV llamado TABBY EVO que es una plataforma de hardware libre para vehículos eléctricos, que no cuenta con un sistema de enfriamiento integrado por lo que puede presentar sobrecalentamientos inesperados, el intercambiador propuesto fue modelado analíticamente y numéricamente, para obtener una simulación útil para evaluar los parámetros más importantes desde el punto de vista de la conducción - convección forzada, tanto para estado estable como transitorio, utilizando el software Computational Fluid Dynamics (CFD) SolidWorks Flow Simulation.

Los resultados obtenidos de las simulaciones en este proyecto demuestran que el intercambiador de calor fabricado resuelve la problemática del vehículo TABBY EVO evitando el sobrecalentamiento del controlador eléctrico mejorando su autonomía debido a que el vehículo se protegía y detenía su movimiento al superar el límite de temperatura soportado por controlador alrededor de 90 °C. Por lo tanto, los resultados presentados se pueden utilizar para obtener simulaciones CFD más realistas de sistemas o sentar las bases para el desarrollo de diferentes estrategias del control de temperatura de los controladores usados en los EV.

Daniel Duarte Reza

ÍNDICE ANALÍTICO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
ÍNDICE ANALÍTICO	3
CAPÍTULO 1.....	5
INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Justificación.....	9
1.3 Hipótesis.....	10
1.4 Objetivo.....	10
1.4.1 Objetivo Particular.....	10
CAPÍTULO 2.....	11
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
2.1 Transferencia de calor.....	11
2.1.1 Conducción.....	11
2.1.2 Convección.....	13
2.1.3 Radiación.....	14
2.1.4 Sistemas conducción-convección.....	15
2.1.2 Convección forzada en intercambiadores de calor.....	17
2.2 Métodos CFD (Computational Fluid Dynamics).....	18
2.2.1 Solidworks Flow Simulation.....	21
2.3 Motores y propulsión en los EV, HEV.....	23
CAPÍTULO 3.....	29
METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS.....	29
3.1 Materiales y equipo.....	29
3.2 Diseño solido 3D de intercambiador para controlador de EV.....	35
3.3 Maquinado de diseño de intercambiador.....	41
3.4 Método analítico en intercambiador diseñado.....	43
3.5 Simulación CFD de intercambiador diseñado.....	47
3.5.1 Análisis 1.....	48
3.5.2 Análisis 2.....	56
3.5.3 Análisis 3.....	61
3.5.4 Análisis 4.....	65
CAPÍTULO 4.....	68
RESULTADOS.....	68
4.1 Resultados análisis 1.....	68
4.2 Resultados análisis 2.....	75

4.3 Resultados análisis 3.....	81
4.4 Resultados análisis 4.....	85
CAPÍTULO 5.....	89
CONCLUSIONES.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	91
LISTADO DE FIGURAS.....	93
APÉNDICES.....	97
Apéndice A. Configuración utilizando el asistente del Software Flow Simulation.....	97

INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

Al día de hoy, nuestra población a nivel mundial está creciendo a un ritmo elevado, junto con este crecimiento exponencial la tecnología se encuentra avanzando al mismo paso para poder satisfacer las necesidades de esta sociedad en todos los ámbitos imaginables, uno de ellos es el ámbito de la automoción.

Actualmente no está en duda que el futuro de la industria automovilística a nivel mundial está encaminada fuertemente hacia la tecnología de los vehículos eléctricos o EV (por sus siglas en inglés, Electric Vehicle), así como por los vehículos híbridos o HEV (por sus siglas en inglés Hybrid Electric Vehicle), actualmente la industria se encuentra en esta transición la cual tendrá importantes repercusiones en el modo en el que se han desarrollado los procesos hasta la actualidad y el reto que se presenta ahora para las compañías automotrices a nivel mundial es cómo llevar esta tecnología a los mercados de la manera más rápida y eficiente, con los mejores procesos y los mejores avances en ingeniería.



Figura 1. Tesla 2020 Model X Long Range con autonomía de 564 km, de acuerdo con la norma EPA (Environmental Protection Agency) (1).

Los vehículos eléctricos son una gran alternativa al auto de combustión interna visto desde los puntos de vista ambientales y socioeconómicos, utilizando la electricidad que es una fuente de energía limpia y no contaminante los vehículos eléctricos se han posicionado como la tendencia a proyectarse en el mercado mundial de la movilidad.

Gracias a ello nuevas empresas han surgido para fabricar vehículos eléctricos en masa, así mismo empresas que tradicionalmente no se han dedicado a la construcción ni puesta en marcha de vehículos eléctricos están incursionando en este campo, ejemplos de ellas son Tesla, y gigantes tecnológicos como Apple, entre otras. Figura 1.

Las compañías tradicionales también se encuentran en la carrera por desarrollar los mejores vehículos eléctricos para no quedarse atrás en esta transición, compañías como la General Motors, Nissan, Ford y Volkswagen actualmente cuentan con vehículos híbridos o totalmente eléctricos. Otras compañías como la japonesa Toyota lleva años teniendo éxito en ventas de autos híbridos, Toyota desde el año de 1997 lanzo la primera generación de su afamado Prius, el automóvil híbrido que se ha vuelto famoso a nivel mundial por su gran autonomía y su diseño futurista, Figura 2.



Figura 2. Toyota Prius Prime el híbrido enchufable con un rendimiento de 22.96 km/l, fuente: EPA (Environmental Protection Agency) (1).

Lo anterior expuesto, aunado a los variables y crecientes precios de las gasolinas a nivel mundial muestra la tendencia y la necesidad de masificar el uso de los vehículos eléctricos usados tanto en el sector público como para el sector privado, es por esta razón que en este trabajo se aborda el estudio de los autos híbridos y autos eléctricos, más específicamente se estudian los controladores de estos vehículos y una problemática existente actualmente que es la de regular la temperatura en los controladores eléctricos que se usan en estos vehículos, como mejorar la eficiencia de su enfriamiento para así mejorar la eficiencia general del vehículo.

Los autos eléctricos actualmente siguen siendo productos con precios de mercado elevados aunque los analistas sugieren que sus precios están bajando mucho más

rápido de lo esperado, sobre todo en los países más desarrollados como lo son los países europeos, Estados Unidos y China, esto debido al desarrollo de baterías más eficientes y baratas y gracias a políticas energéticas en contra del cambio climático las cuales promueven vehículos cero emisiones, sobre todo en los mercados Europeos y Chinos.

Por otro lado, hablando de costos, están los autos híbridos (HEV), los cuales combinan en su sistema de propulsión un motor de combustión interna y un motor eléctrico, estos tienen precios mucho más accesibles para el consumidor, y actualmente es la alternativa que más elige el consumidor promedio, los automóviles híbridos son el punto medio de la transición entre la combustión interna y los automóviles totalmente eléctricos, cabe señalar que el control para el motor eléctrico tanto de los automóviles híbridos como de los totalmente eléctricos se realiza de la misma manera, con los mismos sistemas de control.

Los automóviles del tipo híbrido pueden clasificarse de dos maneras, por un lado, están los automóviles híbridos convencionales HEV y por el otro están los automóviles híbridos enchufables PHEV (Plug-In Electric Vehicle), los PHEV son los más parecidos a los automóviles totalmente eléctricos (EV) por la manera en cómo funcionan ya que comparten la característica de que se pueden recargar enchufándolos a la red eléctrica mediante cargadores. Para los automóviles híbridos cuando el automóvil detecta que las baterías están por agotarse y no se está conectado a la red eléctrica, un generador que funciona con combustión interna se activa para recargar las baterías del automóvil. Más adelante, en el capítulo 3 de esta tesis se discuten más a detalle los diferentes tipos de sistemas de propulsión que existen actualmente.

En la figura 3 se muestra un comparativo de las ventas acumuladas en Estados Unidos de los Automóviles Eléctricos (EV) e Híbridos (PHEV), el cual se extiende desde diciembre del 2010 hasta junio del 2020 (2).

La adopción de las tecnologías de automóviles eléctricos e híbridos la contribución a la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, por ejemplo según los datos tomados del **Toyota Environmental Report 2019** se indica que hasta el 2019 se han vendido aproximadamente 13.53 millones de unidades HEV en todo el mundo dando como resultado una reducción de 108 millones de toneladas de CO₂ (3).

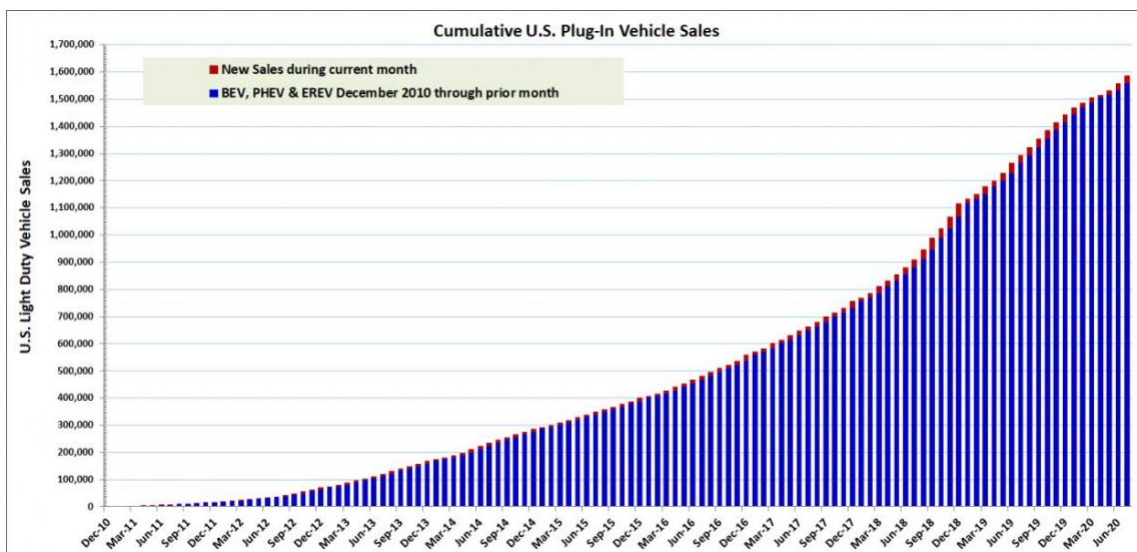


Figura 3. Ventas acumuladas en USA de Eléctricos e Híbridos hasta junio de 2020 (2).

En la figura 4 se puede apreciar un comparativo de todas las ventas mensuales de modelos de automóviles eléctricos enchufables (PEV) que se han vendido en Estados Unidos desde Diciembre del 2010 hasta Junio del 2020 (2), se puede observar un descenso en ventas en el mes de Abril de 2020 derivado por la pandemia mundial ocasionada por virus SARS-CoV-2 que causa la enfermedad por coronavirus Covid-19 que obligo a los gobiernos del mundo a implementar planes de contingencia que afectaron la actividad económica como la venta de autos, aun así se ve una rápida recuperación ya en Junio de 2020.

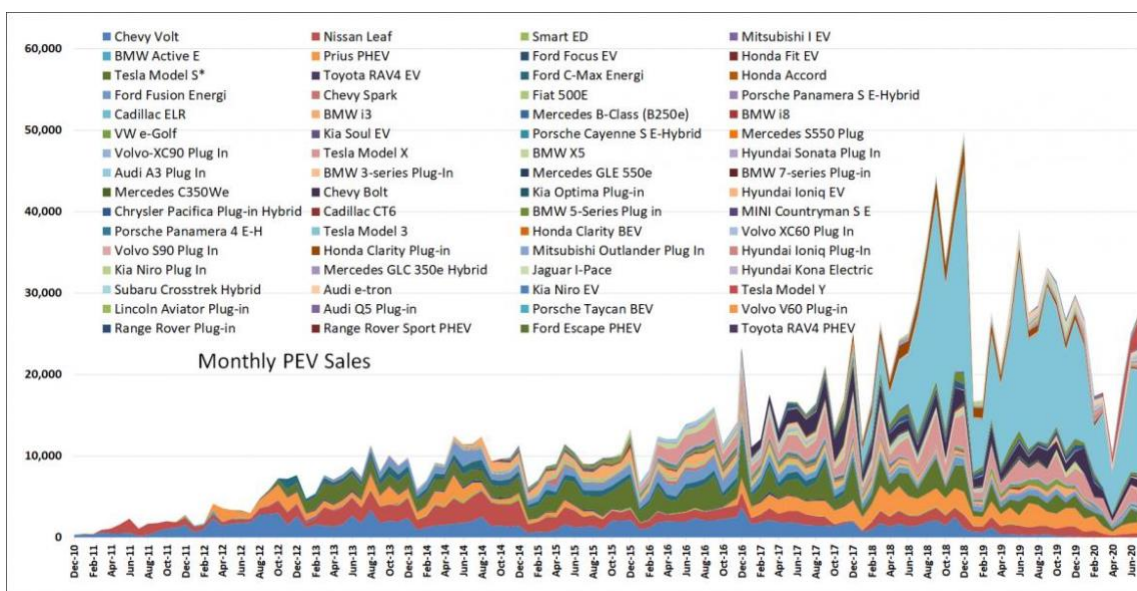


Figura 4. Ventas mensuales en USA de autos enchufables eléctricos e híbridos desde diciembre de 2010 hasta junio de 2019 (2).

Haciendo un comparativo entre las tecnologías actuales de EV y HEV podemos encontrar que dentro de las ventajas de los vehículos totalmente eléctricos (EV) es que la eficiencia energética de estos autos es superior así como el bajo mantenimiento que requieren y entre las principales desventajas de los EV podemos encontrar es la vida útil de sus baterías y los grandes costos que tienen estas baterías actualmente, ya que al reemplazarlas esto significa un gasto fuerte para el propietario del vehículo.

En cuanto a los vehículos híbridos HEV se puede mencionar que sus principales ventajas es su rango de costos los cuales son mucho más accesibles, aunque sus precios aún están por encima de un automóvil convencional de precio bajo lo que hace difícil su adquisición para todos los segmentos del mercado, aun así los vehículos híbridos son más eficientes que los vehículos tradicionales de combustión interna en cuanto al rendimiento de combustible entregando el doble o más de kilómetros recorridos por litro de combustible y sus emisiones de CO₂ así mismo son mucho más bajas que los automóviles convencionales, aunque no tanto como las bajas o nulas emisiones de los EV.

1.2 Justificación.

Como consecuencia de la inestabilidad en el suministro y el alza frecuente en el precio de las gasolinas a nivel mundial, se han realizado esfuerzos para desarrollar vehículos eléctricos (EV) y vehículos híbridos (HEV) durante las últimas décadas. El controlador de un EV funciona como un regulador que suministra la energía eléctrica al motor, así como también gestiona la velocidad del vehículo en la mayoría de los casos como un variador de frecuencia que recibe la señal de control de pedal de aceleración. Esta acción genera una cantidad significativa de calor debido a la resistencia interna del controlador. Para que un EV o un HEV funcione en condiciones óptimas, la temperatura del controlador debe mantenerse dentro de un cierto límite. Por lo tanto, se requiere de un sistema de enfriamiento para el controlador que sea eficiente y efectivo.

1.3 Hipótesis.

Es posible diseñar y simular usando herramientas CFD disponibles para fabricar un intercambiador de calor útil en la refrigeración líquida utilizada en los EV y HEV para evaluar los parámetros más importantes en el control de temperatura en autos eléctricos y ayudar a aumentar la aplicación de estos en futuros proyectos del ramo automotriz.

1.4 Objetivo.

Establecer los principios y análisis usando los conceptos de transferencia de calor aplicados a la refrigeración líquida reagrupando las más exitosas reportadas en la literatura. Estableciendo de forma concisa las ventajas y desventajas de estas técnicas desde el punto de vista tecnológico e industrial.

1.4.1 Objetivo Particular.

Elaborar el diseño, simulación y fabricación de un intercambiador de calor, aplicado a un auto eléctrico de hardware libre TABBY EVO describiendo la influencia de la temperatura sobre el controlador y su comparación con resultados simulados en un software especializado para hacer la simulación del fluido a través de nuestro intercambiador.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1 Transferencia de calor.

2.1.1 Conducción.

La conducción es la transferencia de energía entre las partículas más energéticas de una sustancia a las menos energéticas debido a la interacción entre ellas. Este fenómeno puede tener lugar en los tres estados elementales de la materia; por la colisión de partículas en un fluido (líquido o gaseoso) o la transferencia vibratoria de energía en un sólido. Esta interacción de partículas se describe mediante la ley de Fourier, que establece que la tasa de transferencia de energía por unidad de área \dot{q} es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx por una constante llamada conductividad térmica K (4).

$$\dot{q} = -K \frac{dT}{dx} \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{ec 1.}$$

En un cuerpo sólido, la energía es transferida desde una región de alta temperatura hacia una región de baja temperatura. La tasa de transferencia de calor por área es proporcional a la conductividad térmica del material, área de sección transversal y al gradiente de temperatura. Es inversamente proporcional a la distancia:

$$\dot{Q}_{cond} = KA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (\text{W}) \quad \text{ec 2.}$$

Donde:

\dot{Q}_{cond} = Calor transferido por conducción [W]

K = Conductividad Térmica [W/m.K]

A = Área de Sección Transversal [m²]

T1 = Temperatura en lado 1 Caliente [K]

T2 = Temperatura en lado 2 Frio [K]

L = Distancia que recorre el calor [m]

La conducción es la responsable de la transferencia de calor dentro de un cuerpo sólido.

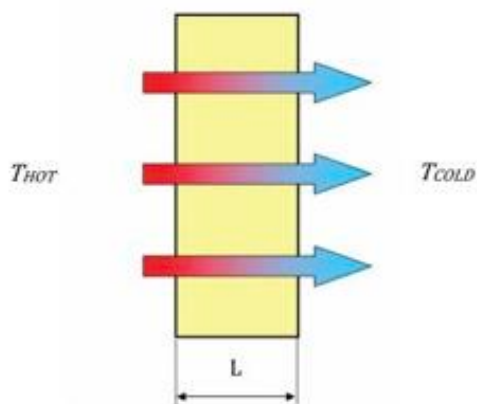


Figura 5. Esquema de transferencia de calor dentro de un cuerpo sólido (5).

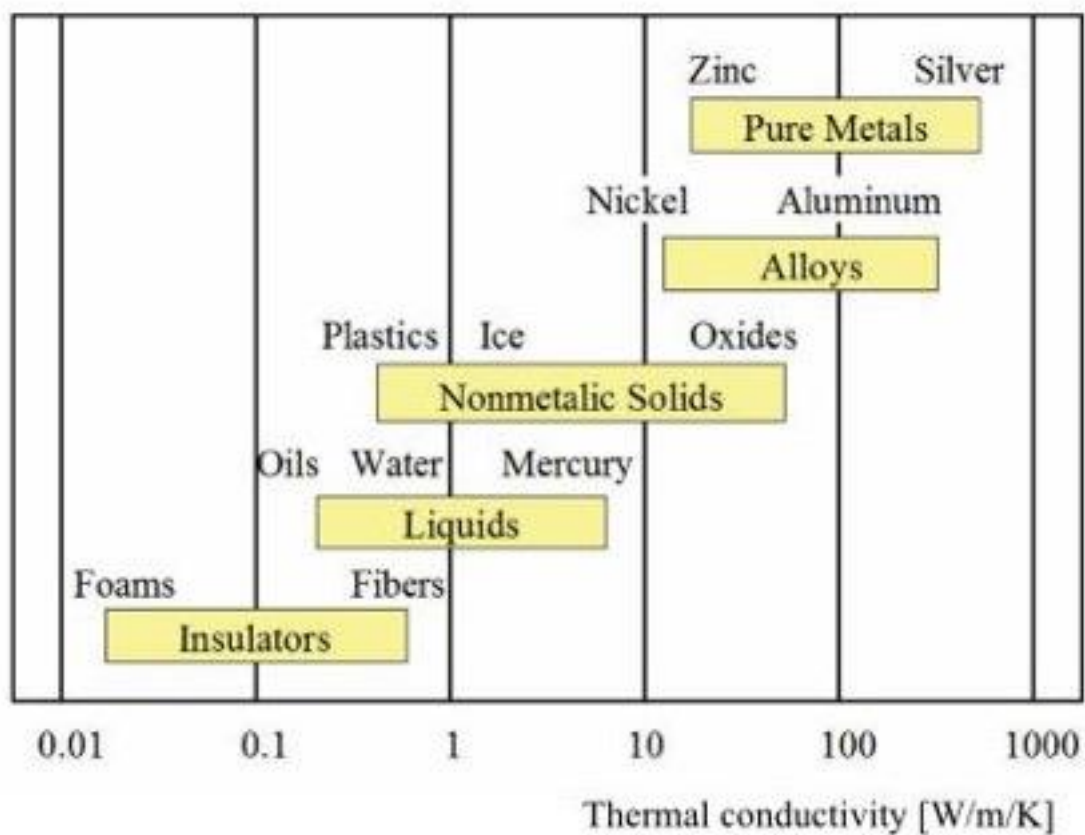


Figura 6. Conductividad térmica en diferentes materiales (5).

2.1.2 Convección.

La transferencia de calor por convección es el flujo de calor entre un cuerpo sólido y el fluido que lo rodea (ya sea Líquido o Gas). La transferencia de calor por convección puede ser ya sea convección natural en donde el flujo del fluido se debe a la variación del peso específico de un líquido frío o caliente, o convección forzada en donde el fluido es forzado a pasar a través del objeto sólido. Por lo tanto, la convección natural requiere de la gravedad, y la convección forzada no requiere de la gravedad. Ya que el fluido (ya sea aire, agua, vapor, aceite, etc.) es requerido para la transferencia de calor por convección, este tipo de transferencia de calor no puede suceder en vacío. La transferencia de calor desde una superficie hacia el medio circundante se expresa por la ley del enfriamiento de Newton como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_w - T_{\infty}) \quad (W) \quad \text{ec 3.}$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} = Calor transferido por convección [W]

h = Coeficiente de convección [$W/m^2/K$]

A = Área de la superficie [m^2]

T_w = Temperatura de la superficie [K]

T_{∞} = Temperatura del fluido (ambiente) [K]

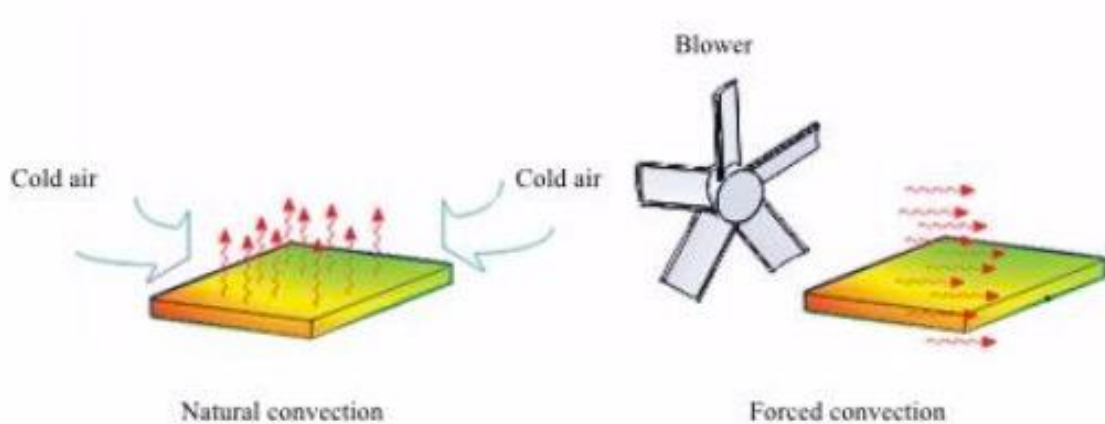


Figura 7. Convección natural y convección forzada (5).

Medio	Coefficiente de Convección W/(m ² ·K)
Aire (Convección natural)	5-25
Aire / Vapor sobrecalentado	20-300
Aceite (Convección forzada)	60-1800
Agua (Convección forzada)	300-6000
Agua (Hirviendo)	3000-60,000
Vapor (Condensándose)	60,000-120,000

Figura 8. Orden de magnitud del coeficiente de película en diferentes procesos (5).

2.1.3 Radiación.

La transferencia de calor por medio de radiación ocurre entre un sólido y el ambiente o entre dos cuerpos sólidos sin que exista presencia de ningún medio (fluido). Este es el único tipo de transferencia de calor que ocurre en vacío. El calor fluye por radiación electromagnética. El límite superior del poder emisor es un cuerpo que irradia calor y está prescrito por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q}_{rad} = \sigma T_{obj}^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{ec 4.}$$

Donde:

\dot{q}_{rad} = Flujo de Calor (Calor emitido por la radiación por unidad de área) [W/m²]

σ = Constante de Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} [W/m²/K⁴]

T_{obj} = Temperatura de la superficie

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura. Se da como:

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \sigma T_{obj}^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{ec 5.}$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon A \sigma T_{obj}^4 \quad (\text{W}) \quad \text{ec 6.}$$

$$\text{Radiación de cuerpo dentro de otro } \dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_{obj}^4 - T_{alred}^4) \quad (\text{W}) \quad \text{ec 7.}$$

En donde ϵ es una propiedad radiativa de la superficie llamada emisividad. Los valores de ϵ se dan en el rango de $0 \leq \epsilon \leq 1$ y proporcionan una medida de que tan bien la superficie emite energía radiativa en comparación con un cuerpo negro. Depende fuertemente en la superficie del material y su acabado. Por ejemplo, una superficie de aluminio pulido tiene una emisividad de alrededor de 0.05; una superficie de aluminio oxidada tiene una emisividad de 0.25. La emisividad depende también de la temperatura de la cara que emite el calor por radiación. En la transferencia de calor por radiación, el calor puede ser radiado al espacio por un solo cuerpo, puede ser intercambiado entre dos cuerpos o puede ser intercambiado entre dos cuerpos, así como radiado hacia el espacio (5).

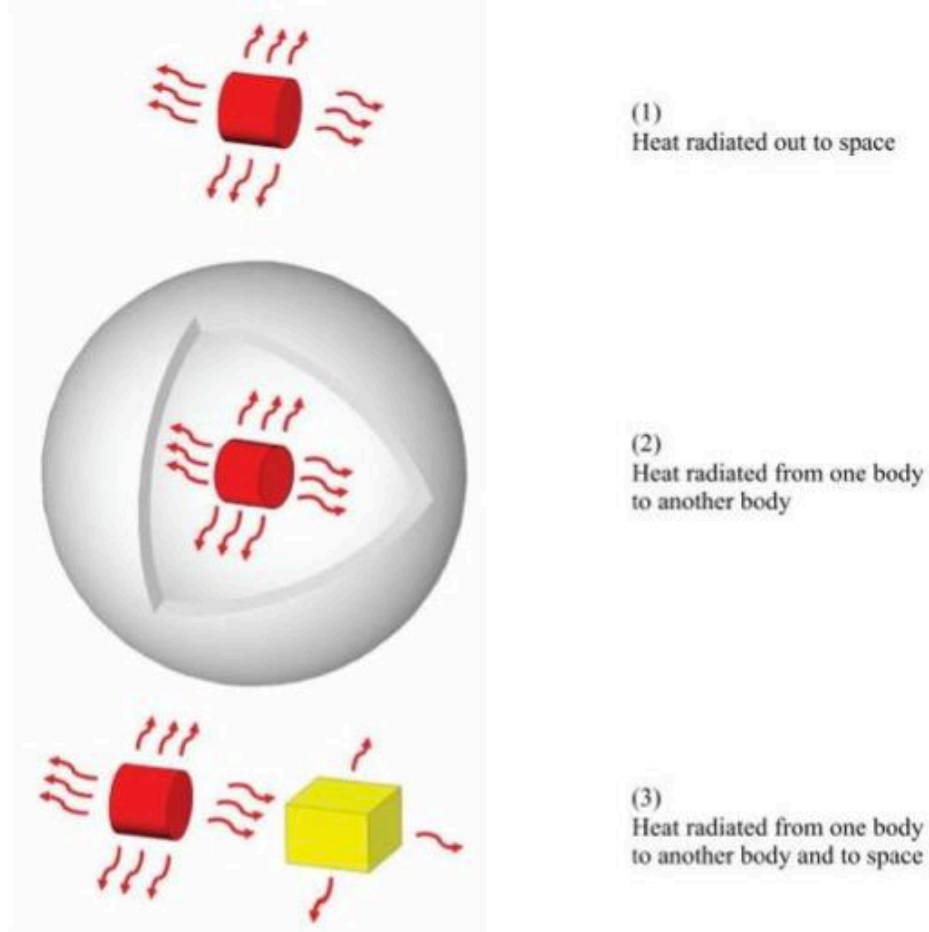


Figura 9. Diferentes casos de transferencia de calor por radiación (5).

2.1.4 Sistemas conducción-convección.

Es común que se analice de forma combinada los efectos de la conducción y convección dentro del mismo sistema.

En la ecuación 3, A es el área de la superficie de la transferencia de calor y h el coeficiente de transferencia de calor por convección. Cuando las temperaturas T_w y T_∞ son fijadas por consideraciones de diseño como normalmente sucede, existen dos maneras mediante las cuales se puede incrementar la razón de la transferencia de calor. La primera es aumentar el coeficiente de transferencia de calor por convección, h . La segunda manera es aumentar el área superficial A . Para lograr aumentar h se puede requerir instalar una bomba o ventilador, o reemplazar los dispositivos existentes con unos más grandes o más potentes lo cual puede llegar a presentar inconvenientes por lo cual este método a veces no es el más adecuado. La alternativa es seguir la segunda opción, aumentar el área superficial de transferencia de calor, esto se consigue agregando superficies extendidas llamadas aletas, las cuales están hechas de materiales con un alto coeficiente de conducción como el aluminio (6).

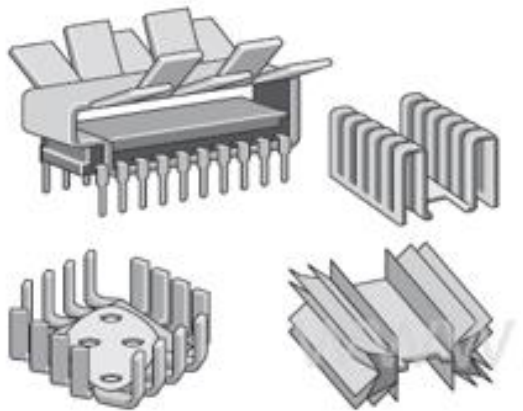


Figura 10. Diseños de disipadores de calor con aletas (6).

Las superficies con aletas de diversas formas se utilizan con frecuencia para los sistemas de enfriamiento de aparatos eléctricos y electrónicos. La energía que disipan estos aparatos se transfiere a las aletas por medio de la conducción y desde las aletas, se transfiere hacia el aire ambiente por medio de la convección ya sea natural o convección forzada, dependiendo de cómo sea diseñado el sistema en base a las necesidades de disipación de calor o potencia.

La convección natural normalmente es el método preferido de transferencia de calor dado que para que se realice no intervienen partes móviles las cuales pueden llegar a presentar averías o requieren mayor diseño. Sin embargo, en este modo

de transferencia de calor es más probable que las partes involucradas funcionen a temperaturas más elevadas y como consecuencia su confiabilidad no es tan grande como en la convección forzada (6).

Al momento de diseñar un sistema de aletas una cuestión que normalmente se presenta es la de la selección de un sistema con poco espacio entre aletas o un sistema con aletas ampliamente espaciadas entre ellas, para un área dada de la base.

2.1.2 Convección forzada en intercambiadores de calor.

La transferencia de calor en intercambiadores de calor usualmente sucede por convección forzada existe cuando se tiene un movimiento masivo del fluido. La transferencia de calor por convección forzada es complicada por el hecho de que comprende movimiento del fluido. El movimiento del fluido mejora la transferencia del calor ya que pone en contacto porciones más calientes y más frías de ese fluido, por lo tanto, la transferencia de calor a través de un fluido es mucho más alta por convección forzada que por convección natural. Entre más alta es la velocidad del fluido, mayor es la transferencia de calor.

La transferencia de calor por convección forzada depende de la cantidad de las propiedades como viscosidad dinámica μ , conductividad térmica K , densidad ρ , y calor específico C_p del fluido, así como de la velocidad del fluido \vec{u} . También depende de la configuración geométrica y aspereza de la superficie sólida, además del tipo de fluido ya sea laminar o turbulento (6).

Debido a esto la convección forzada es considerada el mecanismo más complejo de transferencia de calor.

Los resultados de datos experimentales suelen expresarse en forma de fórmulas y correlaciones empíricas, por tanto, se utilizan datos experimentales para obtener valores de constantes o exponentes de parámetros significativos tales como los números de Reynolds (Re) ó Prandtl (Pr) (7).



Figura 11. En la fotografía se pueden observar estos conductos para enfriamiento del controlador de un Toyota Prius (8).

2.2 Métodos CFD (Computational Fluid Dynamics).

El análisis térmico se ocupa de la transferencia de calor en los cuerpos sólidos. En este trabajo se realiza un acercamiento al análisis térmico desde el punto de vista de la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamics) realizada con SolidWorks Flow Simulation.

En la transferencia de calor por convección abordada analíticamente, debido a su complejidad requiere la utilización de idealizaciones en cuanto al fluido que desvían los resultados, esto se hace mediante un balance de cantidad de movimiento, más conocido como ecuaciones de Navier-Stokes, ecuación 8, que describe el movimiento de un fluido newtoniano, por lo general se consideran pequeñas las variaciones de presión en el interior de los recipientes idealizando como fluido incompresible y las variaciones de temperatura que afectan a la densidad de aire y por ende a las fuerzas de flotación se puede modelar con diferentes grados de aproximación por ejemplo la aproximación de Boussinesq, ecuación 9, según la cual las fuerzas de flotación son proporcionales a la diferencia

de temperatura respecto de un estado de referencia, donde la variación de temperatura puede obtenerse de la ecuación de conducción, ecuación 10.

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \nabla (\mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)) - \nabla p + \vec{F} \quad \text{ec 8.}$$

$$\vec{F} = \rho_{ref} g (\beta (T - T_{ref}) - 1) \quad \text{ec 9.}$$

$$\nabla^2 T + \frac{\rho C_p}{k} \vec{u} \cdot \nabla T = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{ec 10.}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad, β es el coeficiente expansión volumétrico, C_p es la capacidad calorífica, k es la conductividad térmica, \vec{u} es el vector de velocidad en las 3 direcciones, la fuerza \vec{F} de flotación que actúa solo en una dirección, g es la gravedad, T_{ref} , ρ_{ref} es la temperatura y densidad de referencia (9) (10) (11).

Por otro lado, la convección desde el punto de vista numérico puede ser resuelta utilizando método de elemento finitos y/o métodos de volúmenes finitos, aunque este último es el más popular, ambos métodos se combinan en ocasiones (normalmente en mallas estructuradas), como por ejemplo para el tratamiento de las condiciones de contorno y la discretización de los flujos viscosos.

El método de los volúmenes finitos emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral. 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 caras del poliedro (12).

La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de las diferencias finitas.

Comparado con el método de las diferencias finitas, este método es muchísimo más flexible (puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas); por este motivo, el método de los volúmenes finitos es el más empleado para la resolución de flujos con geometrías complejas.

Los principales métodos de resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, se basan en esquemas de resolución independientes para el espacio y tiempo llamados

métodos de las líneas. Esta aproximación nos ofrece una gran flexibilidad, debido a que pueden elegirse diferentes niveles de aproximación tanto para flujos convectivos y viscosos, como para la integración temporal.

Aplicando el método de las líneas a las ecuaciones en volúmenes finitos que gobiernan el problema, se escribe, para cada volumen de control, un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas en el tiempo, gobernadas por la expresión:

$$\frac{\partial(\Omega \vec{M} \vec{W})}{\partial t} = -\vec{R}(\vec{W}) \quad \text{ec 11.}$$

en donde Ω representa el volumen de control considerado y \vec{R} incluye la discretización espacial completa incluido el término de fuentes, normalmente conocido por residuo. El residuo es una función no lineal de las variables \vec{W} . Por último, \vec{M} representa la matriz de masas. Si se emplea la discretización espacial con variables residentes en los vértices, representa el valor medio de \vec{W} en el volumen de control en los valores de los puntos asociados al nodo interior y sus vecinos; por el contrario, si los nodos están centrados en el elemento, la matriz de masas, puede ser sustituida por una matriz identidad, sin desmejorar la precisión temporal del esquema.

En un esquema explícito básico la derivada temporal se aproxima por una diferencia adelantada y el residuo se evalúa en el paso de tiempo actual solamente, es decir:

$$\Delta \vec{W}^n = -\frac{\Delta t}{\Omega} \vec{R}^n \quad \text{ec 12.}$$

Los esquemas más populares son los de múltiples pasos (métodos de Runge-Kutta) donde la solución es función de varios pasos de tiempo. Para obtener la influencia de cada uno de los pasos de tiempo en la solución final, se utilizan una serie de coeficientes. Éstos se optimizan para aumentar la estabilidad y asegurar la convergencia.

Independientemente de la metodología empleada para resolver las ecuaciones gobernantes del sistema, se deben de especificar unas condiciones de contorno e iniciales.

En toda simulación numérica, se considera una parte del dominio fluido para la resolución de las ecuaciones. Esto da lugar a un contorno artificial donde el valor de las variables fluidas tienen que ser especificados a través de lo que se conoce

como condiciones de contorno. En general, las condiciones de contorno se pueden clasificar en:

Condiciones de contorno de flujo libre: pueden ser de entrada, de salida o entrada/salida. Las condiciones de contorno de entrada de flujo se especifican mediante las condiciones en el infinito ($\rho_\infty, \mu_\infty, \vec{u}_\infty, w_\infty, P_\infty, T_\infty$)

Condiciones de contorno de pared: modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de las superficies. Se puede imponer una condición de contorno de no deslizamiento (velocidad nula en el punto de contacto, $u = 0$), o de tangencia (velocidad normal a la superficie igual a cero).

2.2.1 Solidworks Flow Simulation.

El software Solidworks Flow Simulation es una herramienta de análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) que está completamente integrado en el entorno de diseño para todas las aplicaciones de ingeniería general.

Los programas CFD incluyen una representación de las ecuaciones de Navier-Stokes, modelos de turbulencia y modelos de fenómenos físicos. Desde la década de 1980, los códigos CFD han crecido en complejidad, particularmente en el modelado físico. Paralelamente, los sistemas CAD se han convertido en la columna vertebral del proceso de creación de productos en casi todos los sectores de la industria, lo que permite realizar geometrías complejas con relativa facilidad (13).

El complemento llamado SolidWorks Simulation está basado en una técnica numérica llamada Método del Elemento Finito FEM. SolidWorks Simulation es principalmente usado para análisis tanto térmicos como estructurales de cuerpos sólidos. En contraste SolidWorks Flow Simulation se basa en una técnica numérica llamada Volúmenes Finitos CFD la cual es utilizada para el análisis de flujos de fluido los cuales pueden, pero no necesariamente tienen porqué incluir la transferencia de calor (5).

La herramienta Flow Simulation puede ser interconectada de diferentes formas con SolidWorks Análisis Térmicos y con SolidWorks Análisis Estructurales (Estáticos, No Lineales), en la figura 12 se pueden apreciar los tipos de análisis disponibles con Flow Simulation.

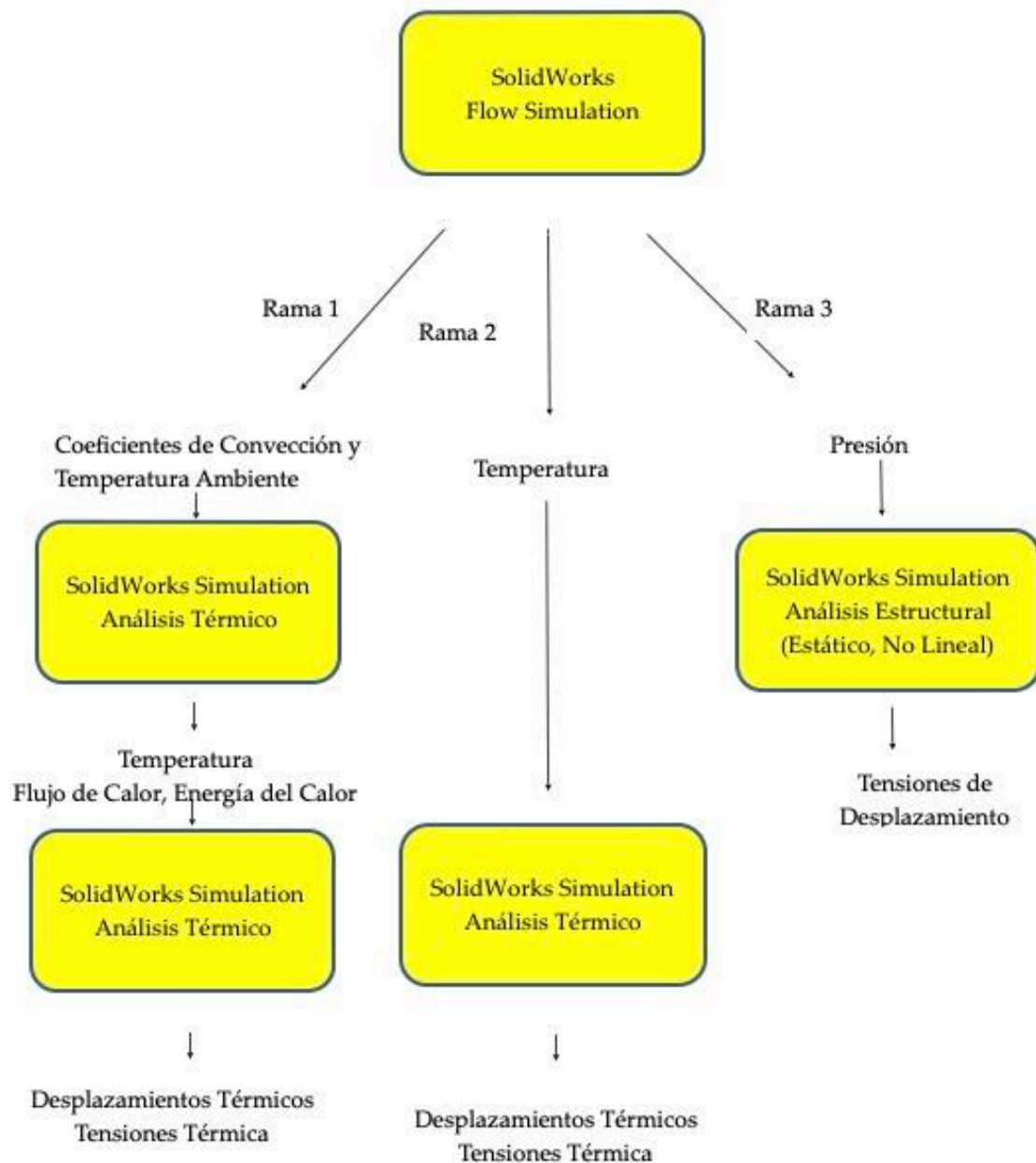


Figura 12. Distintos tipos de análisis disponibles con SolidWorks Flow Simulation.

Si la transferencia de calor no es incluida en el análisis, entonces el módulo de Flow Simulation se ocupará únicamente del espacio donde circula el fluido. Este puede ser una cavidad dentro de un sólido y/o un espacio alrededor de un sólido. Si la transferencia de calor es incluida en el análisis del fluido, entonces Flow Simulation modela la transferencia de calor tanto en el fluido como en el sólido. Los coeficientes de convección que gobiernan la transferencia de calor entre el fluido y el sólido son encontrados por las condiciones del flujo del fluido. Esto es

bastante diferente a un análisis de Simulación Térmico en donde el coeficiente de convección entre fluido y sólido debe ser previamente conocido. Como podemos ver existe una superposición entre el SolidWorks Simulation y el SolidWorks Flow Simulation, ambos pueden hacer análisis térmicos de sólidos. Sin embargo, Flow Simulation desarrolla el análisis térmico solo hasta el punto necesario para poder resolver las condiciones térmicas presentes en el análisis del fluido. Usando el método de Volúmenes Finitos el espacio en donde el flujo de fluido se mueve se discretiza en cubos paralelos al sistema global de coordenadas. Si la transferencia de calor en los sólidos es requerida en el análisis, entonces los sólidos son así mismo discretizados. Un mallado de volúmenes finitos, solo se puede mostrar en una vista de sección transversal como se ilustra en la figura 13.

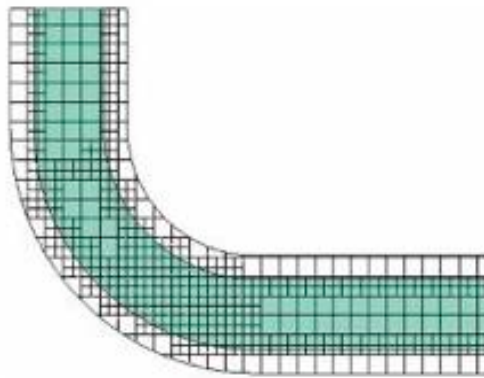


Figura 13. Mallado de volúmenes finitos, más comúnmente referido como cuadrícula (5).

Celdas que modelan el fluido son sombreadas en esta ilustración. Celdas que modelan el sólido (blancas) están aquí solo porque la transferencia de calor en sólidos se requirió antes de generar el mallado. Celdas parciales que modelan el sólido y el fluido están ubicadas a lo largo de las fronteras curvilíneas, las cuales requieren un mallado más refinado de cubos ortogonales para aproximar las curvaturas; por lo tanto, celdas más pequeñas están ubicadas a lo largo de las curvaturas.

2.3 Motores y propulsión en los EV, HEV.

El motor eléctrico es aquella máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Esto lo hace por medio de campos magnéticos variables los cuales hacen mover el rotor del motor. Algunos motores eléctricos pueden ser reversibles, esto quiere decir que pueden transformar la energía mecánica en energía eléctrica, funcionando como generadores. Los motores eléctricos que se utilizan en todos los EV y HEV realizan a menudo ambas tareas, como motor y

como generadores, para esto los EV y HEV a esto se le llama frenado regenerativo sistema en el que recuperan parte de la energía del vehículo durante el frenado.

Las partes principales que conforman el motor eléctrico son el estator, rotor y carcasa. El estator es la parte fija y cilíndrica de la máquina rotativa, este puede ser de electroimanes o también puede estar conformado por placas ferromagnéticas. Dentro del estator se encuentra el rotor que es la parte móvil, este puede estar compuesto por barras de material conductor, puede tener embobinado o puede estar compuesto de materiales magnéticos como imanes de tierras raras como el NdFeB (Neodimio-Hierro-Boro) (14). Según su alimentación, ya sea mediante corriente alterna o corriente continua y según su arquitectura, el motor eléctrico se puede dividir en las siguientes categorías:

- Motor asíncrono o de Inducción (AC)

Es uno de los motores más utilizados en la industria de los EV, está formado por un rotor que puede ser de tipo jaula de ardilla o bobinado. Entre las ventajas encontramos la alta eficiencia, coste bajo, fiabilidad por ello las primeras versiones de Tesla Motors lo utilizaban al igual que los pequeños fabricantes y también es el tipo de motor utilizado en el vehículo eléctrico de hardware libre TABBY EVO.

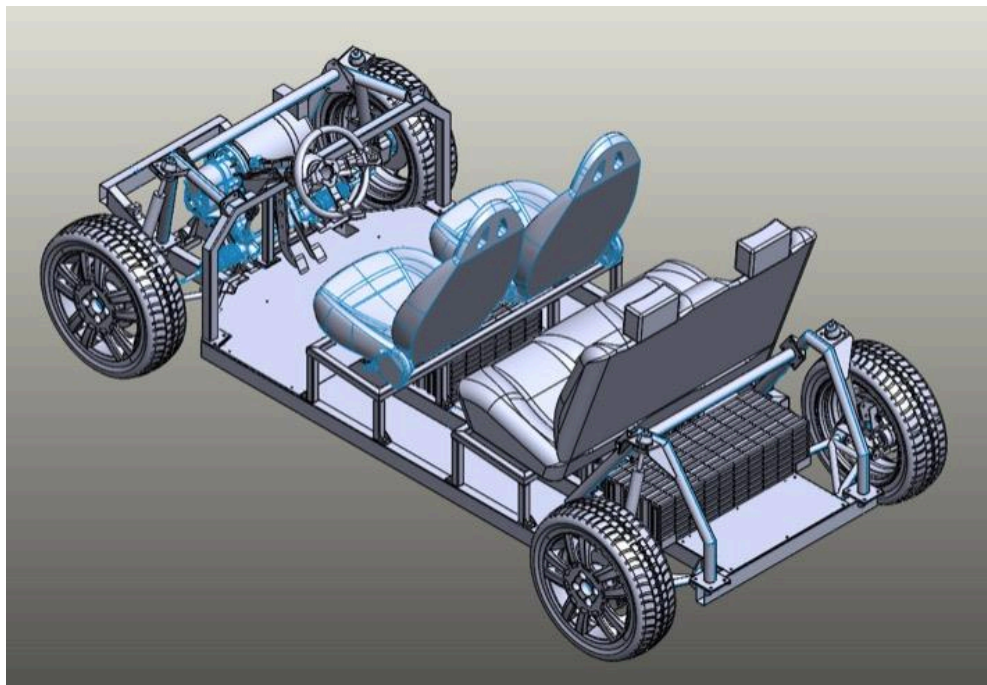


Figura 14. Vehículo eléctrico de hardware libre TABBY EVO

- Motor síncrono de imanes permanentes (AC)
Motor de alto rendimiento, un control de velocidad sencillo, bajo ruido, tamaño y peso. Aunque tienen un alto costo, junto con los motores asíncronos, son los más extendidos dentro de los EV e híbridos. Lo montan Nissan, BMW, VW, Kia, BYD, Smart, el Outlander PHEV y el iMiEV
- Motor síncrono de reluctancia conmutada o variable. (AC)
En estos motores el rotor tiene polos salientes, son influenciados por el campo magnético creando un par que mantiene el rotor moviéndose a velocidad síncrona. Estos motores no necesitan imanes permanentes ni escobillas, y tienen a favor su elevado par, robustez y bajo coste, pero son muy complejos, Renault «Electric Powertrain» lo utiliza (15).
- Motor sin escobillas de imanes permanentes (DC)
Conocidos con «brushless», estos motores poseen imanes permanentes situados en el rotor que funcionan mediante la alimentación secuencial de cada una de las fases del estator.

El sistema de propulsión de los autos eléctricos EV es muy sencillo y en la gran mayoría solo cuentan con una marcha o cambio solo una relación de transmisión ya que la velocidad puede ser controlada electrónicamente.

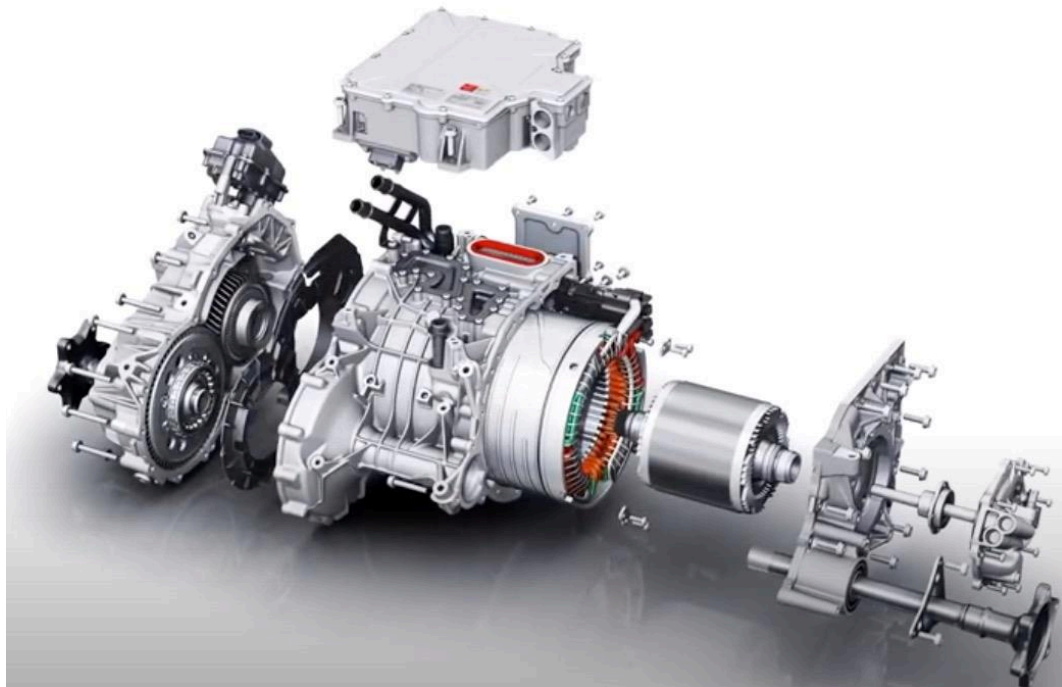


Figura 15. Motor y sistema de tracción de Audio e-tron.

En el caso de los autos híbridos el sistema de propulsión puede ser de tres tipos:

- Sistema paralelo: En este sistema el motor térmico es la principal fuente de energía y el motor eléctrico actúa aportando más potencia al sistema en paralelo. Este es el sistema que utiliza el Honda Insight.
- Sistema combinado: En este sistema el motor eléctrico funciona en solitario a baja velocidad, mientras que a alta velocidad, el motor térmico y el eléctrico trabajan a la vez. El Toyota Prius utiliza este sistema.
- Sistema en serie: En este sistema el vehículo se impulsa sólo con el motor eléctrico, que obtiene la energía de un generador alimentado por el motor térmico. El Chevrolet Volt es un híbrido eléctrico en serie.



Figura 16. Motor eléctrico del Toyota Prius, se pueden ver cuatro cables que son las 3 fases y el neutro de una conexión en estrella.

Todos los motores antes mencionados a excepción de los brushless son alimentados con un conjunto de tensiones polifásicas alternas (senoidales o trapezoidales), generadas por medio de un circuito con variador de frecuencia, mejor conocido como el controlador, estos controladores pueden utilizar diferentes técnicas para generar las ondas senoidales necesarias siendo la más innovadora la técnica llamada SPWM (modulación del ancho de pulso senoidal), que recientemente fue utilizada para este objetivo (16), ver figura 17.

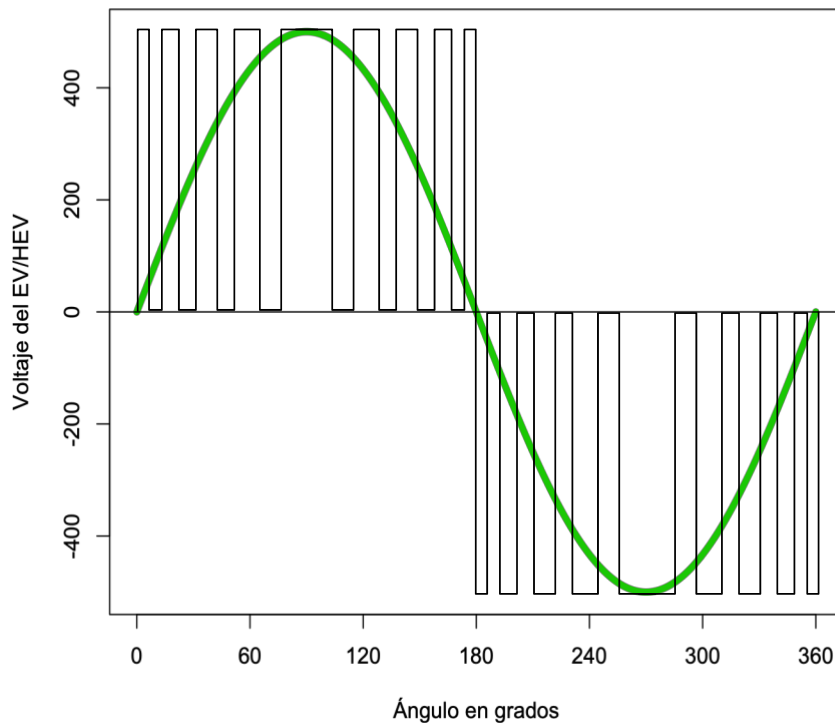


Figura 17. La imagen muestra control de la onda senoidal usando un SPWM (16).

Los motores eléctricos usados en los EV y HEV tienen bobinas de excitación (usualmente tres o un múltiplo de tres) que están distribuidas en el estator, que dependiendo el fabricante puede ser conexión delta o estrella, siendo la conexión estrella la más usada (17), ver figura 16 y figura 18.

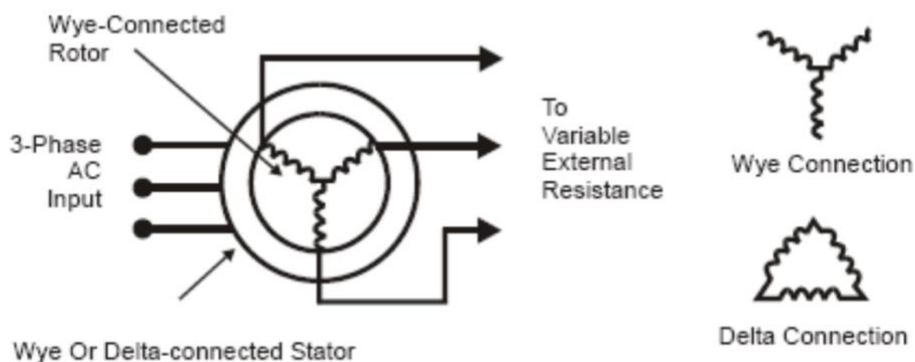


Figura 18. Circuito equivalente, conexión en “estrella” sin neutro y “delta”.

El control de los diferentes tipos de motores usados en autos eléctricos puede ser fácilmente explicado en base al motor síncrono ya que independientemente de la tecnología y tipo de motor C.A. ya sea síncrono o de inducción, usado en un EV todos son controlados por medio del estator. En la máquina síncrona de imán permanente clásica de un solo par de polos (la de embobinado más simple) las

espiras del estator están conectadas formando un sistema de tres bobinas, lo que produce un circuito trifásico balanceado simétrico, que se alimenta conectándolo a un sistema de alimentación eléctrica trifásica, formado por tres fases desfasadas 120 grados entre sí.

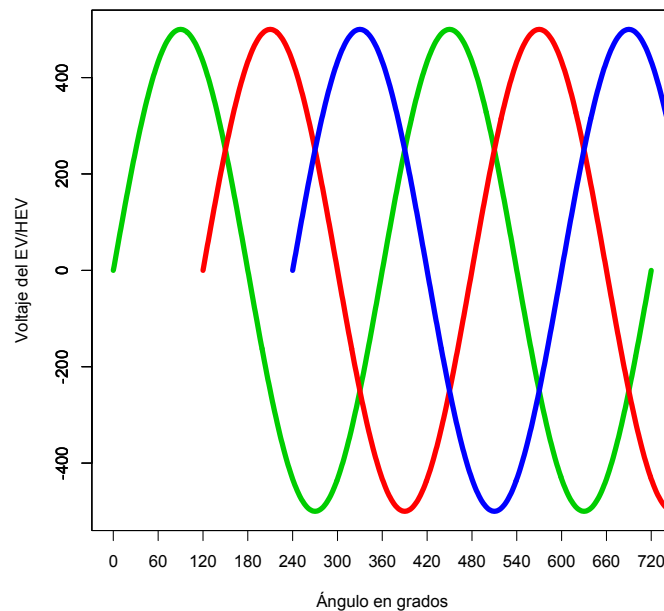


Figura 19. Ondas de voltaje requeridas para activar cualquier motor de un EV/HEV (16).

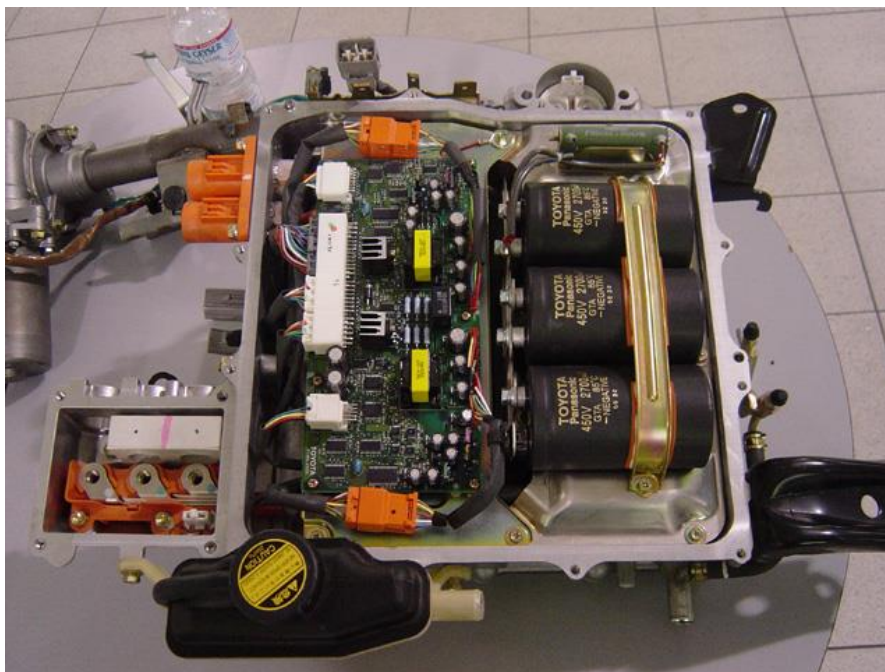


Figura 20. Fotografía de controlador o inversor de Toyota Prius (18).

METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS.

3.1 Materiales y equipo.

Material	Abreviación
Controlador AC-L1	AC-L1
Placa de Aluminio	6061-T6
Máquina de CNC Eumach V-16	Eumach V-16
Programa de CNC BobCAD-CAM.	BobCAD-CAM
Resistance Temperature Detector	RTD
Bomba hidráulica Bavite 1.2 GPM	Bavite 1.2
Manguera Variflex 300psi	Variflex 300
Tanque de Almacenamiento de Refrigerante	TAR
Conjunto radiador ventilador.	Conjunto R-V
Convertidor DC/DC Chennic JCDI41	JCDI41
Lenovo Edge 15	Edge 15

Los materiales utilizados para este proyecto son los necesarios para crear nuestro intercambiador de calor, el cual se colocó por la parte debajo del controlador que se requiere enfriar, el cual como se mencionó anteriormente, al estar trabajando, superaba las temperaturas de diseño de su fabricante y por lo tanto se apagaba de manera radical, por lo que la placa del intercambiador se decidió colocar en la parte inferior del dispositivo para así lograr extraer la mayor cantidad de calor de él posible y mantenerlo dentro de un rango de temperatura adecuado para que el controlador trabaje correctamente.

El controlador usado en el vehículo eléctrico de hardware libre TABBY EVO fue el Controlador AC-L1 de la compañía SME Group.

La computadora utilizada para realizar el modelado y simulaciones de transferencia de calor es una Lenovo Edge 15 equipada con Intel Core i7, 12 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 10 64 bits, cuenta a su vez con el programa SolidWorks 2016 Premium x64 con el módulo de Flow Simulation instalado.



Figura 21. Controlador AC-L1.

El material base para realizar el intercambiador es una placa de aluminio 6061-T6 de 21 cm de ancho por 19 cm de altura con un espesor de 5/8", se eligió realizar la placa de este material debido a las excelentes propiedades de conducción de temperatura del aluminio, así como su resistencia, el aluminio ha sido usado en proyectos de transferencia de calor desde hace muchos años y hasta la fecha sigue siendo uno de los materiales más utilizados.



Figura 22. Placa de aluminio 6061-T6 utilizada en este proyecto.

La placa de aluminio se decidió cortar de estas medidas en base a las dimensiones del controlador AC-L1 ya que como se mencionó antes, la placa se coloca en la parte inferior del controlador y ambos deben quedar bien sujetos el uno al otro, por lo que se busca que las dimensiones de la base del controlador y de la placa sean las mismas.

Para llevar a cabo el proceso de maquinado se utilizó la maquina CNC de 3 Ejes EUMACH V-16 con un controlador FANUC Series Oi-MC, a la cual se le cargó el diseño del intercambiador de calor realizado en el Software de CAD 3D Solid Works del cual se hablará más adelante. A su vez el centro de maquinado utilizó el software de programación de CNC BobCAD-CAM el cual da las indiciones a la máquina de CNC a partir del modelo de CAD de SolidWorks, para que el CNC machine la pieza.

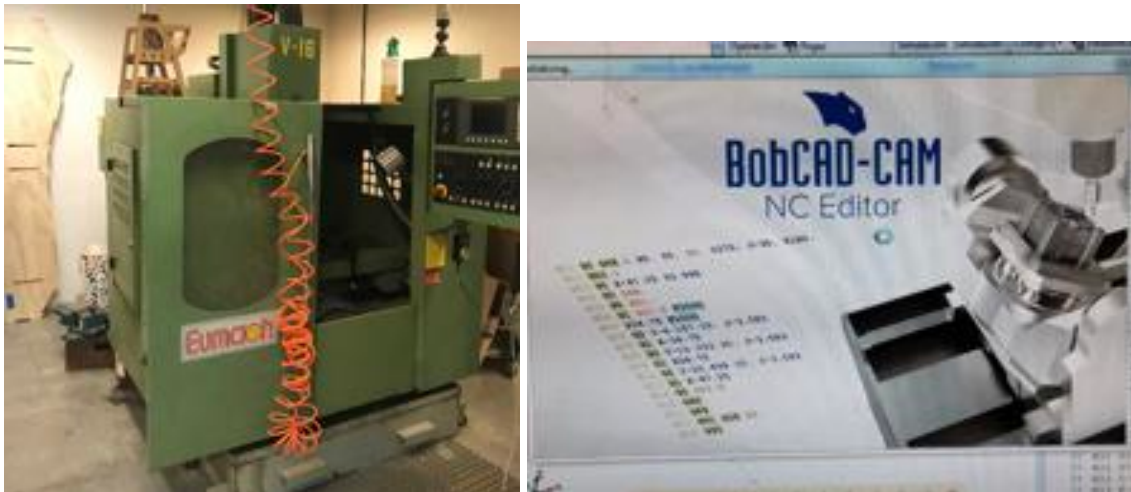


Figura 23. Izq. Máquina de CNC Eumach V-16, Der. Programa de CNC BobCAD-CAM.

El proceso de maquinado de esta pieza se realizó en CNC, para dar precisión al diseño de las ranuras y conductos de la placa y hacer el trabajo lo más preciso posible ya que se busca que el sistema sea hermético y no permita fugas de líquido enfriador ni goteos de líquido, por lo cual se buscó la placa quedara lo más lisa posible en sus partes de contacto con la placa inferior del controlador.

Como se mencionó anteriormente, la placa del intercambiador debe ir sujeta a la placa de aluminio de la base del controlador, deben ir pegadas ambas placas, debido a que pasará el líquido refrigerante a presión por en medio de las placas, se deben evitar fugas de líquido, ya que estas a la larga podrían dañar algunos sistemas del automóvil, o simplemente el sistema de enfriamiento se quedaría sin refrigerante lo que ocasionaría un sobrecalentamiento.

Para evitar esto, ambas placas se sellan con tornillos y con ayuda de un silicón formador de juntas se terminan de unir herméticamente para rellenar las juntas y cualquier pequeña imperfección por donde pueda escapar el líquido.

El silicón elegido para este trabajo es el LOCTITE 5699 debido a sus buenas propiedades como resistencia a altas temperaturas, seguro para trabajar con líquidos corrosivos y aceites y su buen funcionamiento para uso en alto desempeño.

En el diseño se crearon tres orificios para poder medir la temperatura a la entrada y salida del intercambiador de calor para esto se utilizaron RTDs (del inglés: Resistance Temperature Detector) los orificios que se maquinaron al costado de la placa especialmente a la medida de estos sensores, la función de estos RTDs será la de evaluar las temperaturas del líquido que circula por dentro de la placa para determinar el calor extraído el sistema para así poder mantener al controlador dentro de su temperatura nominal de operación.

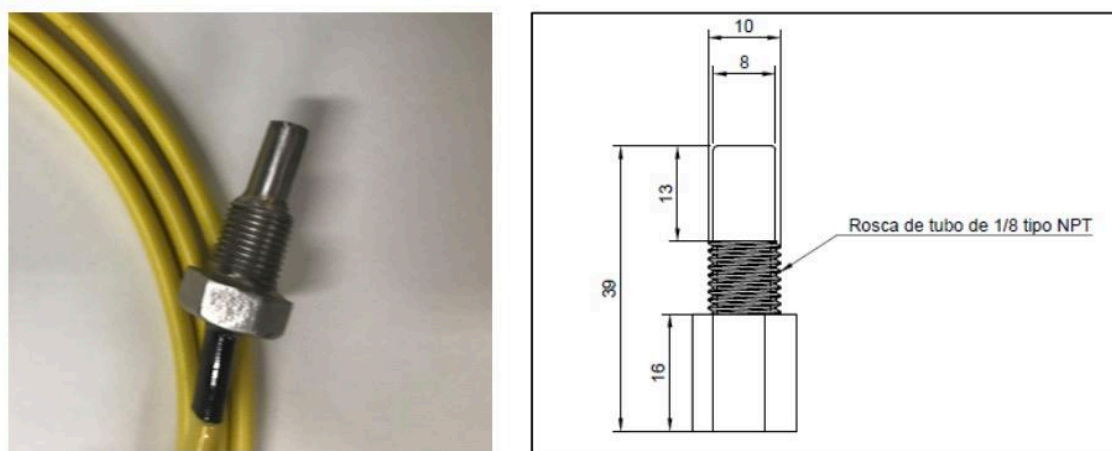


Figura 24. Izq. Fotografía del RTD utilizado en medición de temperatura, Der. Medidas del RTD.

Otra función de los RTD es encender la bomba de enfriamiento cuando se alcance la temperatura programada en un microcontrolador siendo esta la temperatura de 90 °C este microcontrolador lee la temperatura y posteriormente activará y desactivará la bomba en un sistema de control de lazo cerrado, produciendo el ciclo de enfriamiento.

Las mangueras utilizadas para conducir el fluido a través del sistema son mangueras de presión marca Continental "Variflex" de 3/8" de 300 psi, se buscó que fuera de este tipo de manguera soporta bien las altas temperaturas a las que podría llegar a calentarse el fluido aparte de que presenta buenas características de resistencia y flexibilidad lo cual nos ayudará debido al recorrido que hace la manguera a lo largo del chasis del automóvil doblándose en algunos ángulos y

pasando entre tubos y componentes, por lo cual es primordial que no se rompa ni presente fisuras ni goteos.



Figura 25. Bomba hidráulica Bayite 1.2 GPM y manguera Variflex 300psi.

Para el proyecto se utilizará una bomba de la marca Bayite de 12 volts, 5 amperes, la cual proporciona una presión de 80 psi y entrega un flujo de líquido de 1.2 GPM o 4.5 LPM, la cual es suficiente para alimentar el sistema de enfriamiento, llevando el agua a través de los elementos interconectados del sistema, el tanque, el radiador, la placa.

Para almacenar el líquido refrigerante (refrigerante o anticongelante automotriz basado en etilenglicol) se utiliza un contenedor de aluminio de 21 cm de largo por 13 cm de ancho y una profundidad de 5 cm.



Figura 26. Tanque de almacenamiento de refrigerante.

Se utilizará un radiador que es el elemento del sistema que se encargará de enfriar el refrigerante después de que este pase a través del intercambiador de calor

3.2 Diseño solido 3D de intercambiador para controlador de EV.

Para la construcción del intercambiador se comenzó con la sesión de diseño, las metas planteadas para el diseño de este intercambiador eran principalmente:

- Construir un dispositivo que disipara el calor generado por el controlador del vehículo, el cual al operar en un clima cálido llegaba a registrar temperaturas de hasta 100 °C trabajando el vehículo, momento en el cuál en controlador se sobrecalentaba y procedía a apagarse para proteger al sistema de fallas irreparables. Por lo que el dispositivo debía evitar este sobrecalentamiento de alguna manera.
- La siguiente limitante era el espacio, el controlador al estar ubicado cerca de la batería del EV se encontraba en el suelo del vehículo, a un costado del asiento trasero, no había mucho espacio de maniobrabilidad hacia donde poderlo mover para tener más área de trabajo por lo que se decidió dejar el controlador en su posición, pero eso implicaba que el dispositivo con el que se disiparía el calor debía ser también de tamaño reducido.

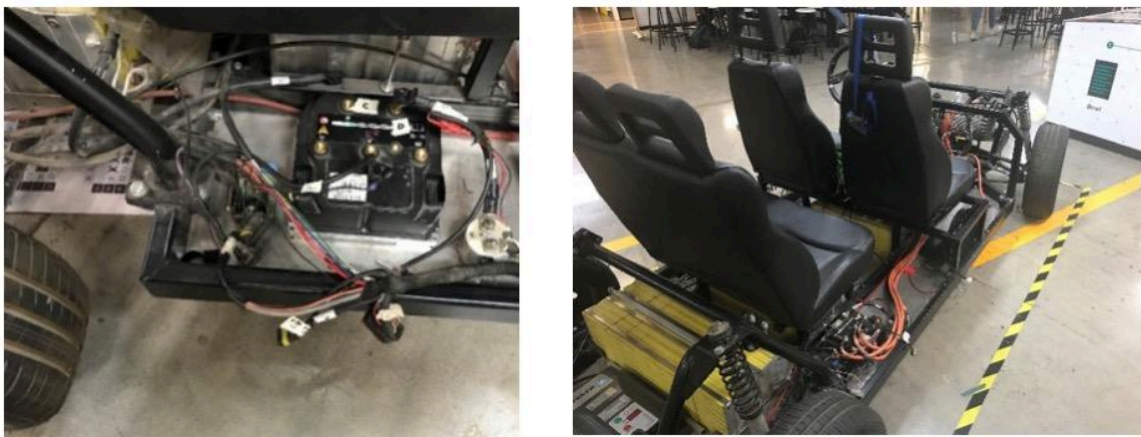


Figura 29. Vehículo eléctrico de hardware libre TABBY EVO utilizado en este proyecto para diseñar el sistema de enfriamiento líquido.

- La última meta a cumplir por el dispositivo, que se planteó para el proyecto era la resistencia y durabilidad del mismo, como este sería usado en un vehículo eléctrico, el dispositivo estaría sometido a toda clase de fuerzas, altas temperaturas y sobre todo fuertes vibraciones, así como algunos golpes ocasionados por el uso del vehículo en terrenos irregulares o en avenidas con problemas de baches, calles agrietadas, etc. Por lo cual la entereza del dispositivo, así como la de todo el sistema a diseñar era de vital importancia.

Teniendo estas metas en mente, se pensó cual sería la forma más conveniente de resolver los problemas, basándonos en diseños actuales de enfriamiento de vehículos convencionales de combustión interna y de vehículos híbridos y eléctricos, así como observando los diseños de intercambiadores de calor utilizados en otras diversas áreas de la ingeniería se fueron proponiendo algunos diseños que se pudieran adaptar a las necesidades de lo que se buscaba con este proyecto.

Después de haber considerado las opciones propuestas, se decidió por hacer un intercambiador de calor a base de dos placas de aluminio, y con una trayectoria especial ranurada por el centro de la placa inferior por la que circularía el líquido refrigerante, el cual, al entrar en contacto con la placa superior, calentaría el líquido circulante, despejando temperatura de la placa superior, la cual a su vez se aprovechó, es la placa que se encuentra en la base del controlador del EV. Construir el intercambiador de esta manera, a su vez ahorraría espacio y resolvería el problema de dónde colocar el intercambiador, se colocaría justo por debajo del controlador, sin necesidad de tener que mover este de su lugar.

El primer paso para la construcción del intercambiador fue la de crear su diseño del sólido paramétrico en 3D, como ya se mencionó anteriormente, se utilizó el software de modelado de componentes SolidWorks.

Se comenzó definiendo las medidas que tendría el intercambiador, como el intercambiador debía tener las mismas medidas que la base del controlador, donde se ensamblaría, figura 30. Como se puede observar en el plano del controlador proporcionado por el fabricante, en su base, la placa del controlador tiene unas medidas de 210 mm de ancho por 190 mm de altura así como un espesor de la placa de 18 mm, es importante también visualizar los cuatro orificios con los que cuenta la placa, uno en cada esquina de 6.5 mm de diámetro, originalmente estos orificios se usan para ensamblar el controlador con la superficie donde se va a ubicar, pero en este caso estos orificios se aprovecharán ahora para acoplar la placa base de nuestro intercambiador con el controlador.

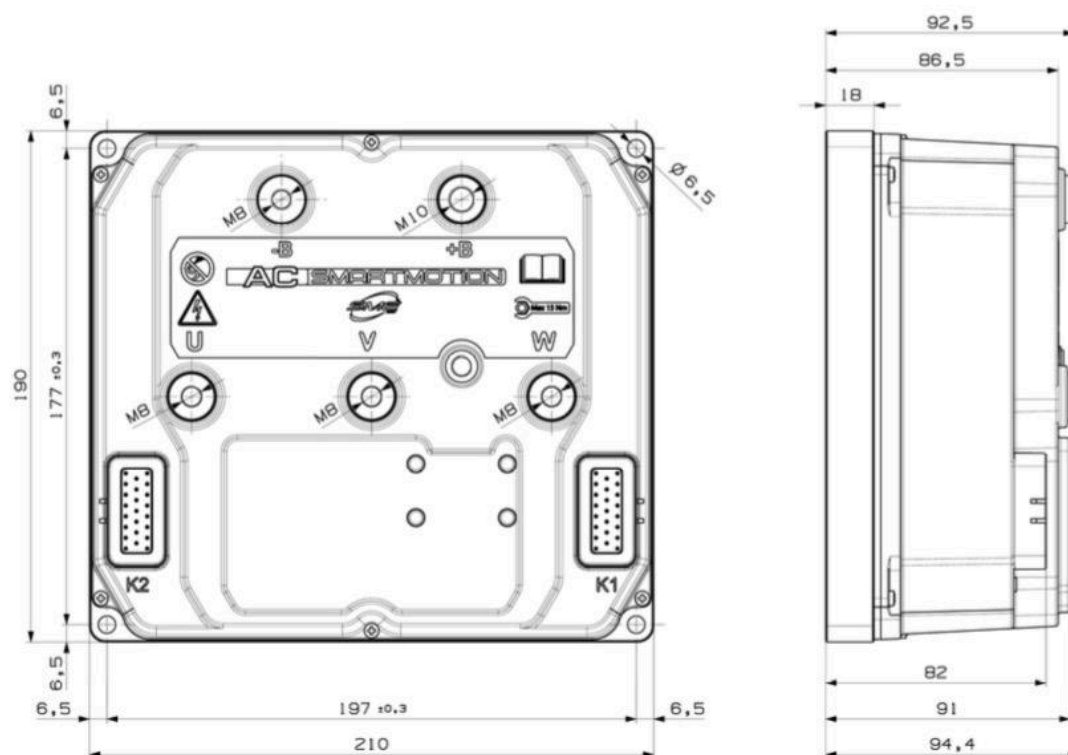


Figura 30. Medidas del controlador AC-L1, utilizadas para la fabricación del intercambiador de calor.

El primer paso para dibujarlo en SolidWorks es hacer el croquis de la base, un cuadrado, de 210 mm de ancho por 190 mm de altura.

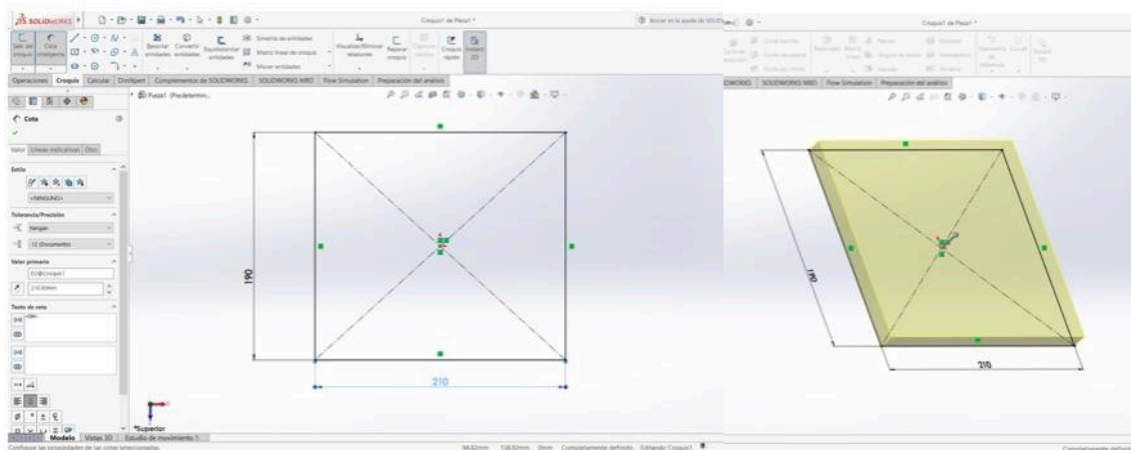


Figura 31. Croquis de la base y extrusión de 5/8".

Se extruye el croquis dándole una altura o espesor de 15.875 mm o lo que es 0.625" o 5/8 de pulgada posteriormente se dibujó el croquis propuesto sobre la placa, los cuales son el patrón geométrico para crear la trayectoria del canal por donde circulará el líquido enfriador.

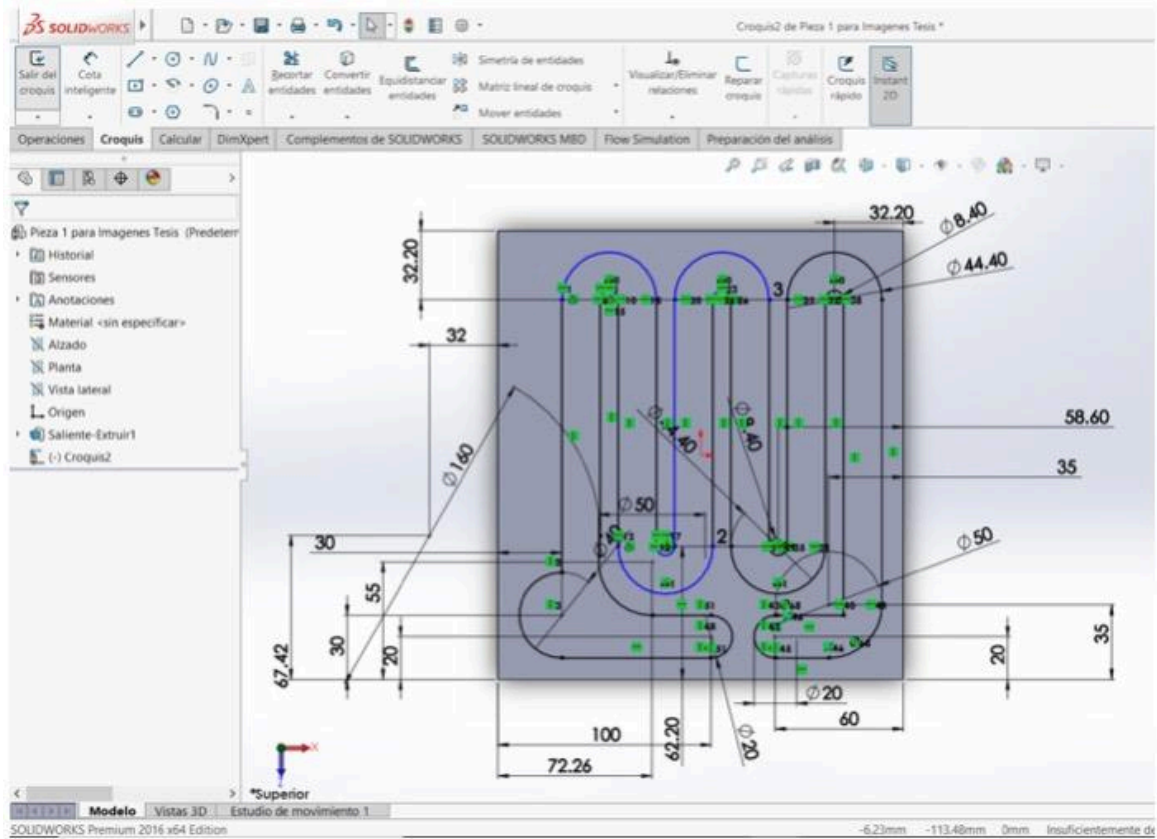


Figura 32. Croquis utilizado para producir el canal del intercambiador de calor diseñado.

Posteriormente se realizó la extrusión de corte del croquis dibujado sobre la placa, y se le da una profundidad de 10.875 mm a la operación, que será la profundidad del ducto. Además del canal fue necesario realizar los agujeros por donde se harán las conexiones de entrada y salida del líquido refrigerante, así como los agujeros donde se colocarán los sensores de temperatura los cuales registrarán la temperatura de entrada, así como la temperatura de salida del líquido refrigerante, además de los orificios de ensamble con el controlador, figura 33.

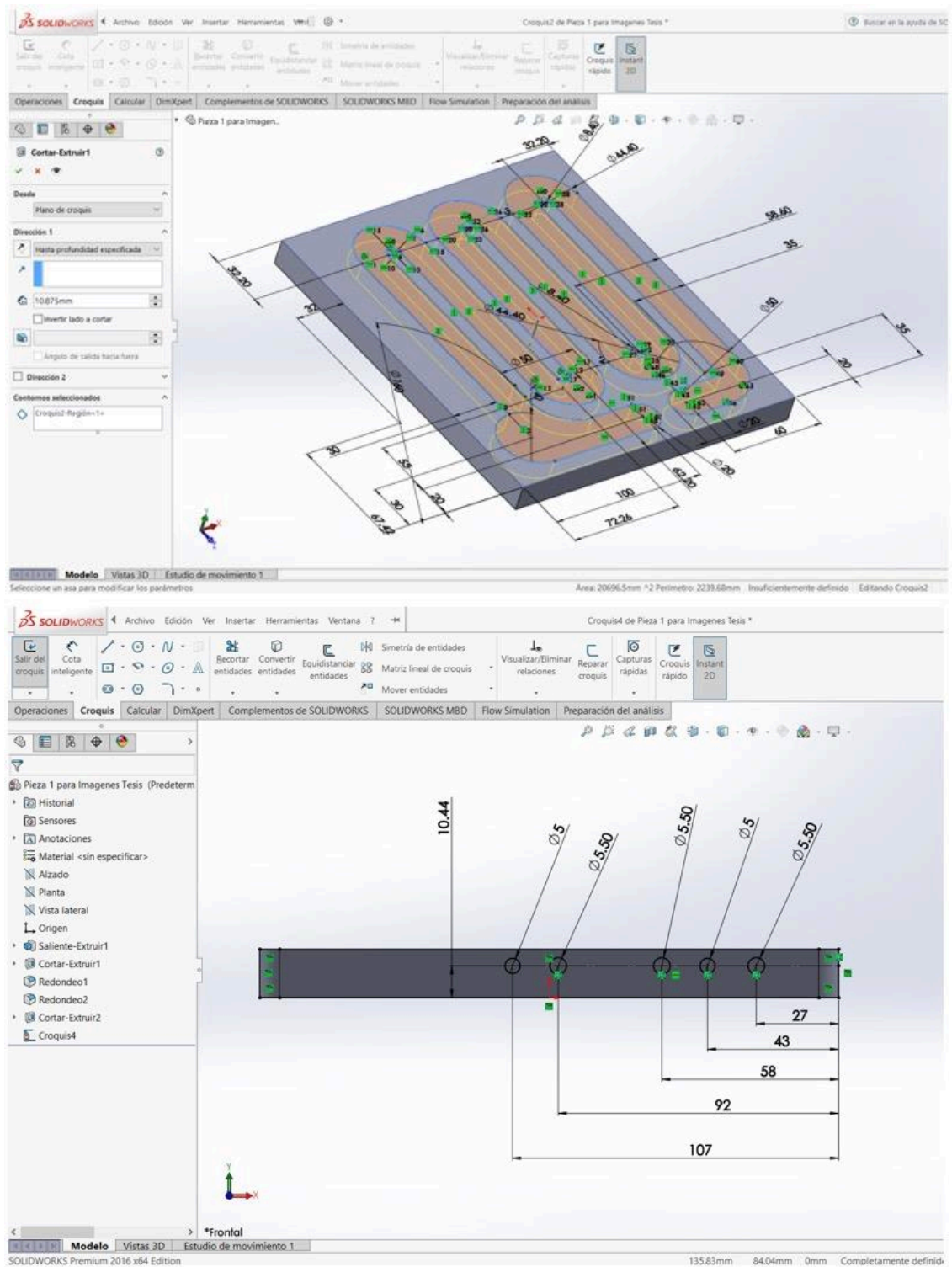


Figura 33. Croquis utilizado para colocación de sensores de temperatura.

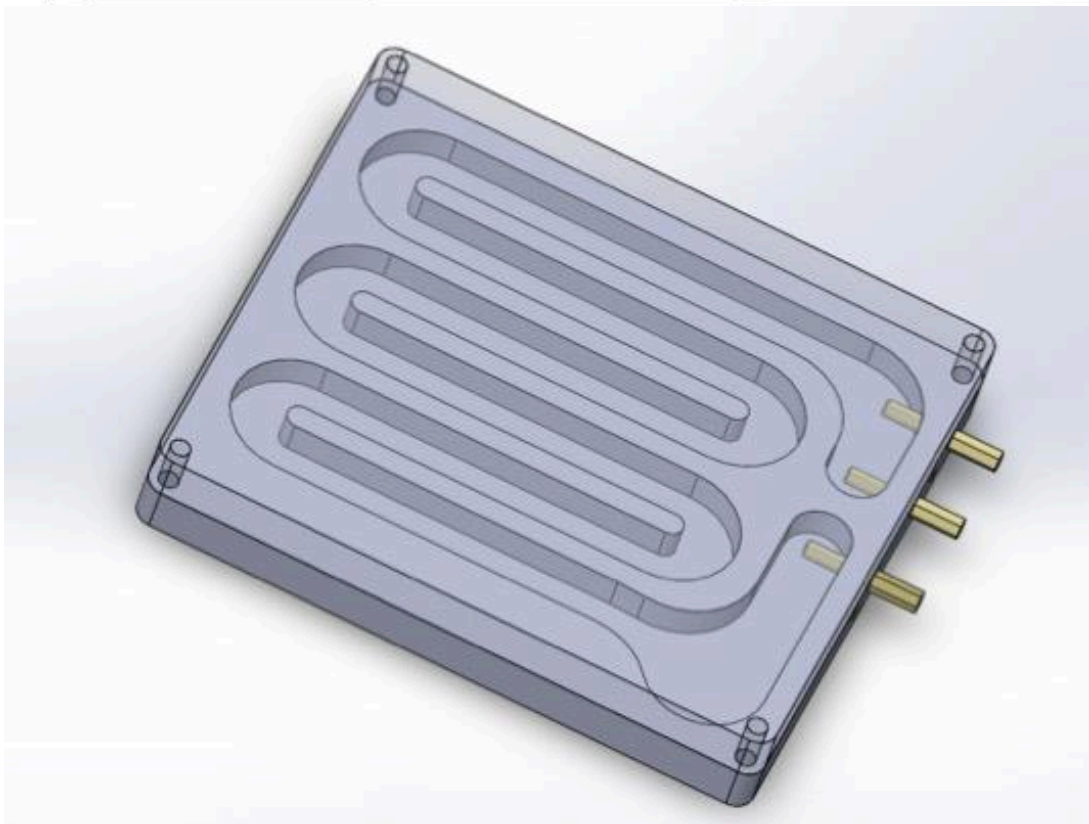
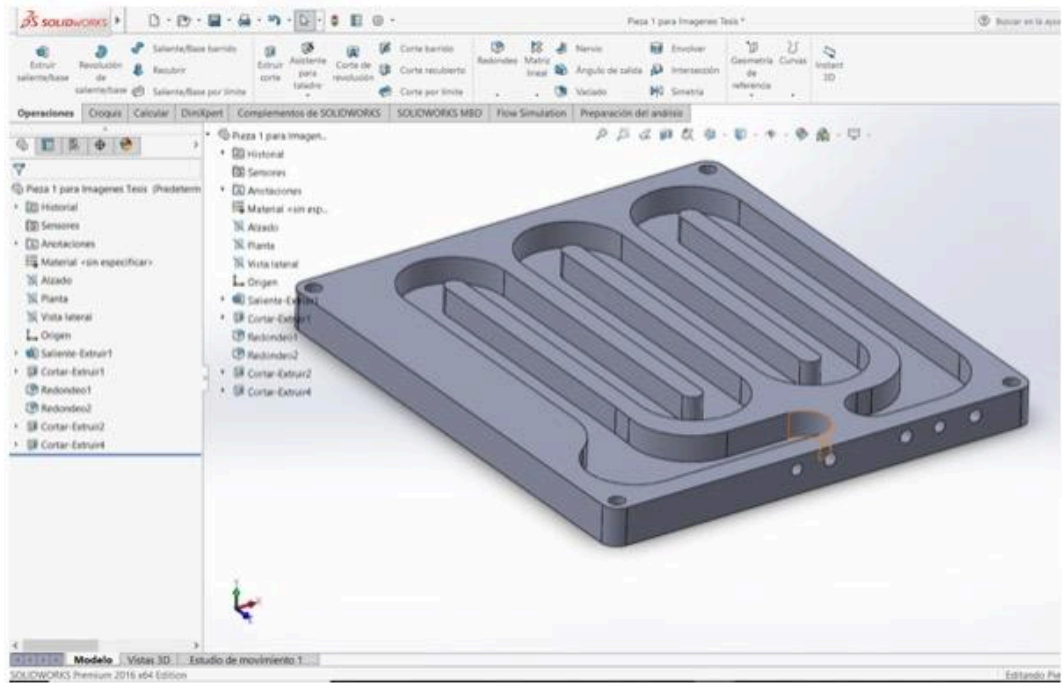


Figura 34. Diseño generado del intercambiador de calor en formato de solido paramétrico en 3D.

3.3 Maquinado de diseño de intercambiador.

Se maquinó la placa en un CNC de 3 Ejes EUMACH V-16 con un controlador FANUC Series Oi-MC, para esto con ayuda del Software BobCAD-CAM NC Editor se convirtió el modelo de SolidWorks a formato STL y posteriormente a comandos del CNC que son entendibles por la máquina CNC.

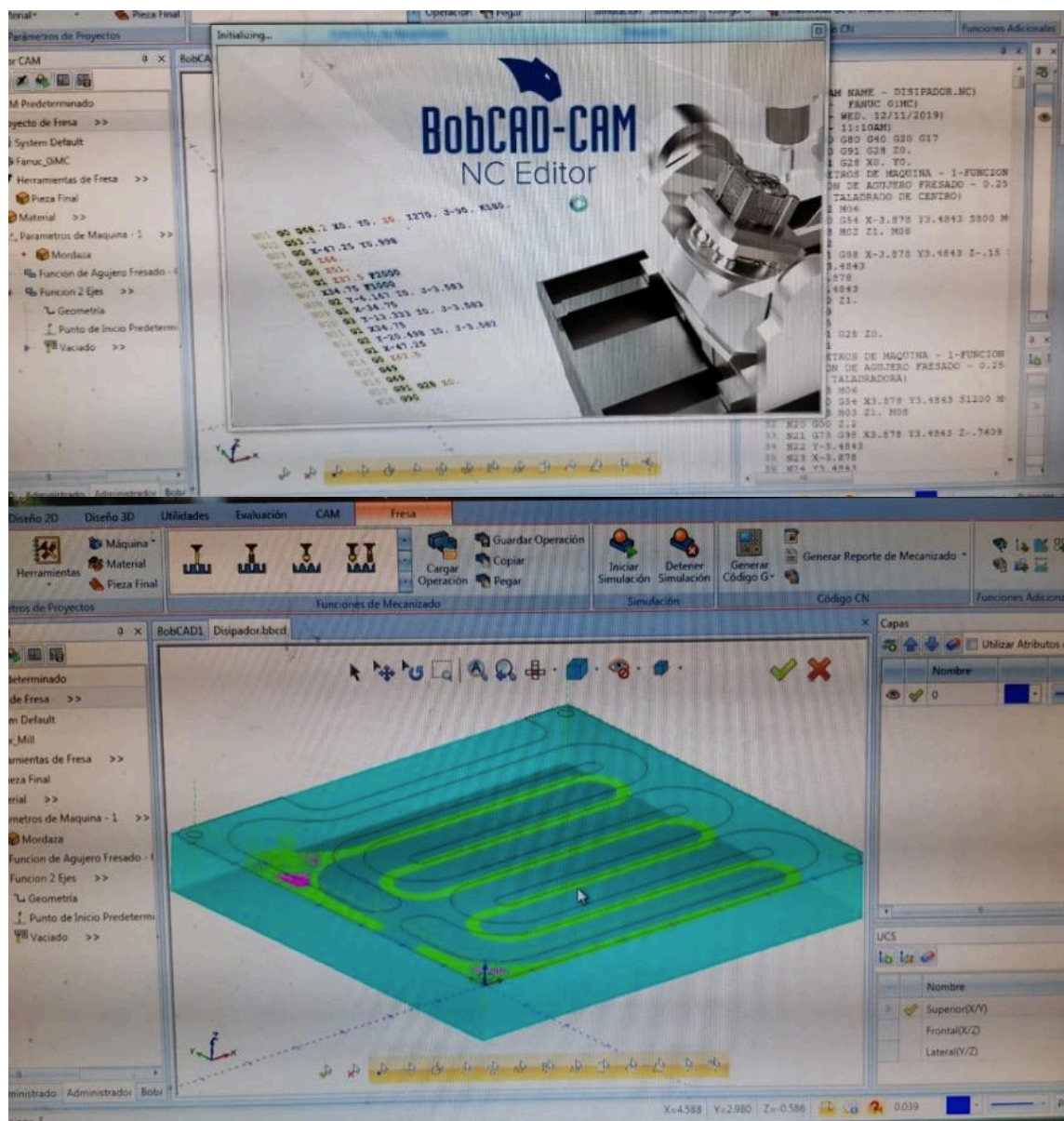


Figura 35. Diseño generado del intercambiador del proyecto en software CAM (Manufactura asistida por computadora).

Una vez procesada la pieza en el programa, se realizó el proceso de maquinado de la placa, en la imagen se muestra el proceso.



Figura 36. Proceso de maquinado de la placa del intercambiador.



Figura 37. Prototipo de intercambiador fabricado.

3.4 Método analítico en intercambiador diseñado.

En este punto se detallará un modelo analítico para determinar la transferencia de calor por convección forzada, calculando el coeficiente de película interno h para el intercambiador de calor, como ya se mencionó anteriormente cuando se usa SolidWorks Flow Simulation en el análisis a un fluido y se incluye la transferencia de calor Flow Simulation encuentra automáticamente los coeficientes de convección que gobiernan la transferencia de calor entre el fluido y el sólido, modelando la transferencia de calor tanto en el fluido como en el sólido. Pero si el análisis fuera una simulación únicamente térmica el coeficiente de convección entre fluido y sólido debe ser previamente conocido. Aquí describimos el procedimiento para obtenerlo si se requiere hacer solo simulación térmica.

El coeficiente de transferencia de calor por convección, h , se puede definir como: La tasa de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de superficie por unidad de diferencia de temperatura (6).

El coeficiente de transferencia de calor o también llamado coeficiente de película puede ser obtenido a partir de la ecuación teórica del número de Nusselt:

$$Nu = \frac{hx}{k}$$

Despejando la h , el coeficiente de transferencia de calor, que es lo que se busca, queda la ecuación:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{x}$$

Donde:

Nu = Numero de Nusslet (adimensional)

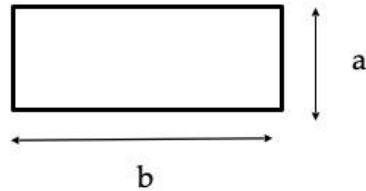
K = Conductividad térmica del fluido (W/(m·K))

x = Longitud característica (m)

En este caso la longitud característica corresponde al diámetro hidráulico definido por la ecuación:

$$DH = \frac{2ab}{a + b}$$

Donde:



Estas medidas de “a” y “b” son tomadas de la sección transversal del conducto de sección rectangular formado en el conducto del intercambiador de calor fabricado, este conducto que fue maquinado en la placa inferior del intercambiador basado en las medidas de diseño propuestas por nosotros.

$$a = 10.875 \text{ mm} = 0.010875 \text{ m}$$

$$b = 18 \text{ mm} = 0.018 \text{ m}$$

$$DH = \frac{2(0.010875)(0.018)}{0.010875 + 0.018}$$

$$DH = 0.0135584 \text{ m}$$

Seguido se calcula el número de Reynolds para saber si el flujo es turbulento o laminar utilizando la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\dot{m}}{0.785 DH \mu}$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico (kg/s)

DH = Diámetro Hidráulico (m)

μ = Viscosidad dinámica del fluido (Pa·s)

Las propiedades deben ser calculadas a la temperatura que se obtiene con la fórmula:

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2}$$

Donde:

T_m = Temperatura media del líquido (°C)

T_e = Temperatura de entrada del líquido (°C)

T_s = Temperatura de salida del líquido (°C)

Utilizando datos de diseño para condiciones de operación normal del intercambiador se puede tomar una temperatura de entrada del líquido ambiente de 30 °C, y una temperatura de salida del líquido en condiciones de operación del EV de 90 °C por lo que la fórmula quedaría como sigue:

$$T_m = \frac{30 + 90}{2}$$

$$T_m = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Un valor importante para poder obtener el número de Reynolds es la viscosidad dinámica del fluido, en este caso se aproximan las propiedades al agua siendo que el refrigerante es 80% agua, por lo tanto, para obtener el valor de μ se tienen que recurrir a las tablas de propiedades del agua saturada, en este caso entrando con la temperatura media T_m obtenida de 60 °C, se busca en la tabla el valor de la viscosidad dinámica a esa temperatura y se obtiene el resultado:

$$\mu = 0.467 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

El flujo másico se obtiene tomando los datos de placa de la bomba de fluido del sistema de refrigeración la cual marca un flujo másico de 4.5 LPM los cuales transformados a kg/s dan un resultado de 0.08 kg/s

Una vez obtenidos los datos anteriores se puede proceder a obtener el número de Reynolds:

$$Re = \frac{0.08 \text{ kg/s}}{0.785 (.013558\text{m}) (0.467 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s})}$$

$$Re = 16095.149$$

Si el número de Reynolds es mayor a 2000 el flujo se considera turbulento, en este caso:

$$Re = 16095.149 > 2000$$

Por lo tanto el flujo es Turbulento, una vez conociendo que el flujo es turbulento se procede a utilizar la ecuación de Dittus – Boelter para calcular la variable del Número de Nusselt:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$$

$$n=0.4 \text{ cuando } n= \text{caliente}$$

$$Nu = 0.023 (16095.149)^{0.8} (2.75)^{0.4}$$

$$\underline{Nu = 79.949}$$

Con el número de Nusselt calculado se puede proceder ahora a calcular el coeficiente de transferencia de calor h , como se mencionó al principio de este capítulo, utilizando la ecuación:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{x}$$

La conductividad térmica K del agua se obtiene así mismo de las tablas de las propiedades del agua saturada, entrando con $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ se tiene un valor de K de:

$$k = 0.654 \frac{\text{w}}{\text{m } ^{\circ}\text{C}}$$

Quedando la fórmula del coeficiente de transferencia de calor de la siguiente manera:

$$h = \frac{79.949 \times 0.654 \frac{\text{w}}{\text{m } ^{\circ}\text{C}}}{0.0135584 \text{ m}}$$

$$h = 3,856.40 \frac{\text{w}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$$

Este coeficiente de película es un valor esperado para un flujo turbulento como se vio en el capítulo de antecedentes.

Si es requerido calcular la transferencia de calor por convección forzada interna de forma analítica puede utilizarse entonces la ley de enfriamiento de Newton y el h calculado.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_w - T_{\infty}) \quad (\text{W})$$

3.5 Simulación CFD de intercambiador diseñado.

Se realizaron 4 análisis con diferentes condiciones para evaluar los efectos de estos parámetros sobre el intercambiador. En todos los análisis la temperatura inicial del sólido (el intercambiador) fue de 90 °C y la temperatura ambiente fue de 30 °C.

Análisis 1. Simulación en convección forzada temperatura inicial 90 °C sobre todos los sólidos. Simula condición de inicio de ciclo de enfriamiento.

Análisis 2. Simulación en convección forzada temperatura 90 °C sobre sólido que representa la placa del controlador. Simula condición de larga operación de ciclo de enfriamiento.

Análisis 3. Simulación con fluido estático temperatura 90 °C sobre sólido que representa la placa del controlador. Simula condición de flujo apagado (posible falla de bomba) en ciclo de enfriamiento después de larga operación.

Análisis 4. Simulación con fluido estático temperatura inicial 90 °C sobre todos los sólidos. Simula condición de apagado de ciclo de enfriamiento.

ANÁLISIS 1:

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90°C
Temp. del Ambiente:	30°C
Temp. de Líquido:	30°C
Temp. Aplicada Sobre Placa:	No Aplicada

ANÁLISIS 4:

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90°C
Temp. del Ambiente:	30°C
Temp. de Líquido:	NO CIRCULA LIQUIDO
Temp. Aplicada Sobre Placa:	90°C

ANÁLISIS 2:

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90°C
Temp. del Ambiente:	30°C
Temp. de Líquido:	30°C
Temp. Aplicada Sobre Placa:	90°C

ANÁLISIS 3:

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90°C
Temp. del Ambiente:	30°C
Temp. de Líquido:	NO CIRCULA LIQUIDO
Temp. Aplicada Sobre Placa:	NO SE APLICA TEMPERATURA SOBRE PLACA

Todos los análisis fueron realizados en estado transitorio aprovechando las ventajas de Solidworks Flow Simulation modela la transferencia de calor tanto en el fluido como en el sólido.

En el apéndice A se explica la configuración necesaria para una simulación utilizando el asistente del Software Flow Simulation el cual es una extensión del programa SolidWorks, se realizará el estudio de transferencia de calor en el modelo al aplicar las variables de temperatura y del fluido que circula por el intercambiador, ahí se detalla el paso a paso de cómo es que se realizó el estudio.

3.5.1 Análisis 1.

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90°C
Temp. del Ambiente:	30°C
Temp. de Líquido:	30°C
Temp. Aplicada Sobre Placa:	No Aplicada

El análisis 1 se desarrolló en estado transitorio, esto es incluyendo la variable de tiempo en el estudio, la simulación desarrolla el comportamiento del fluido pasando por dentro del intercambiador y como ambos se comportan durante 10 segundos.

Realizamos un ensamble del intercambiador de calor, como se puede observar en la figura 38, este ensamble está formado por los componentes que se usarán para el modelo real, la placa superior representa la placa base del controlador, la placa inferior la cual se maquinó con la trayectoria que seguirá el fluido, en color amarillo se observan los sensores de temperatura que llevará el intercambiador para registrar temperaturas de entrada y de salida del líquido, adicionalmente para poder realizar este estudio utilizando Flow Simulation se deben colocar en la entrada y salida de las mangueras unos «tapones» sólidos cilíndricos, esto para delimitar en el software el volumen en donde se encuentra el líquido, así que se pueden apreciar en la entrada y salida del intercambiador estos dos pequeños tapones que no afectan en nada al estudio, al contrario lo permiten.

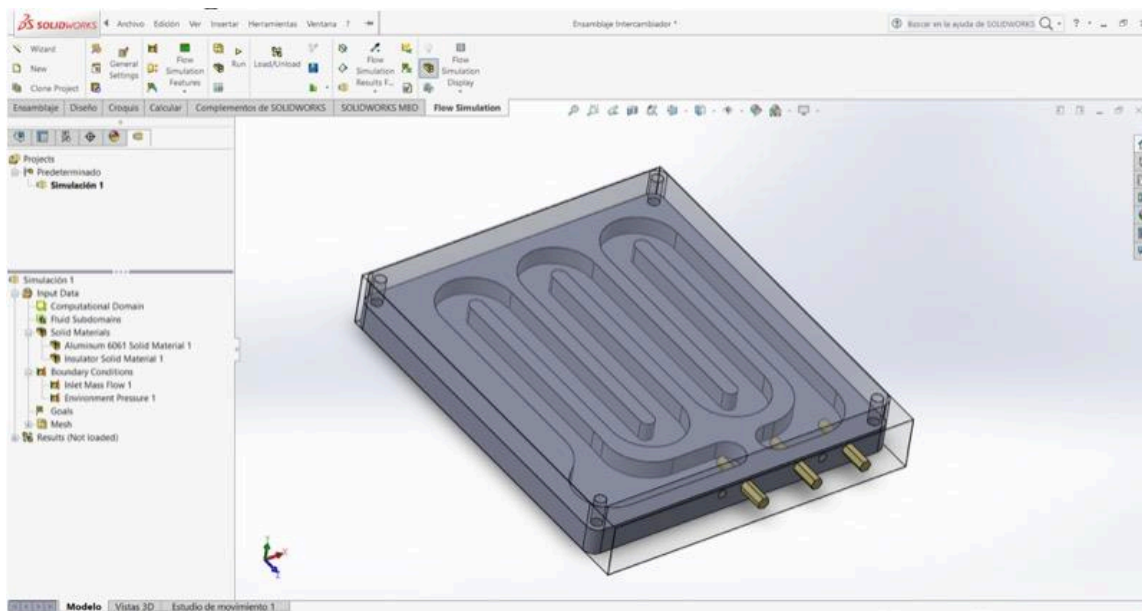


Figura 38. Ensamble de intercambiador utilizado para los análisis.

Se seleccionó el material principal del sólido para el estudio CFD desde el punto de vista del fluido, en este caso el material de las placas que como se mencionó anteriormente es la aleación de Aluminio 6061, posteriormente también se volvió a seleccionar materiales a cada componente para el cálculo FEM ya dentro del material.

Para la temperatura del fluido externo se usó la de 30°C con el valor sugerido h de $50 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ (5) que serán las condiciones ambientales, no confundir este coeficiente de película externo con el coeficiente interno ya anteriormente se ha explicado que si la transferencia de calor es incluida en el análisis del fluido, entonces Flow Simulation obtiene los coeficientes de convección internos por las condiciones del flujo del fluido automáticamente por lo cual no es necesario indicar h interno. Dentro de la ventana de trabajo se definió el material de cada componente seleccionando en el árbol de ensamblajes las partes como el intercambiador y placa a las que les asignamos el material Aluminio 6061 esta selección es necesaria para el cálculo FEM dentro de los materiales para la transferencia de calor.

Para los tapones se les aplicó el material «Insulator» para que no interfieran con los valores del estudio, este material se encuentra en la opción «Glasses and Minerals».

Dentro de la opción «boundary condition e insert boundary condition», se estableció el flujo de líquido entrante sobre la superficie interior del «tapón» de la entrada en el intercambiador con un valor de flujo másico de 0.08 kg/s ya que esta

es la capacidad de flujo que nos entrega la bomba que se está utilizando en este sistema. Así mismo se le da al flujo entrante una temperatura de 30 °C la cual es la temperatura ambiente de este estudio. Y sobre el «tapón» de la salida se aplicó condición de presión atmosférica, necesario para establecer un sentido de flujo en la simulación.

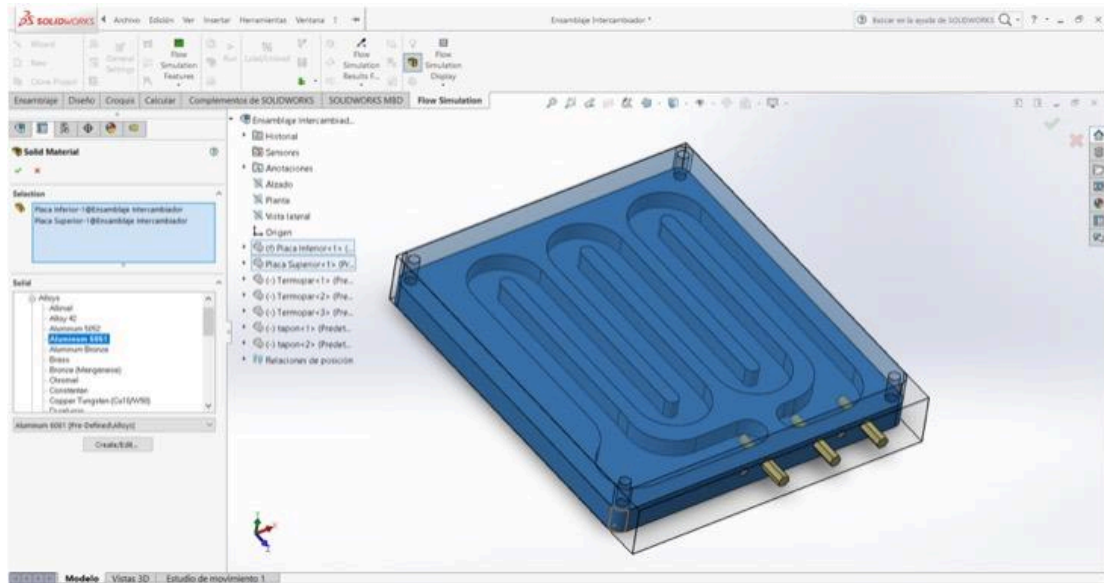


Figura 39. Definición de material para cada componente, en análisis 1.

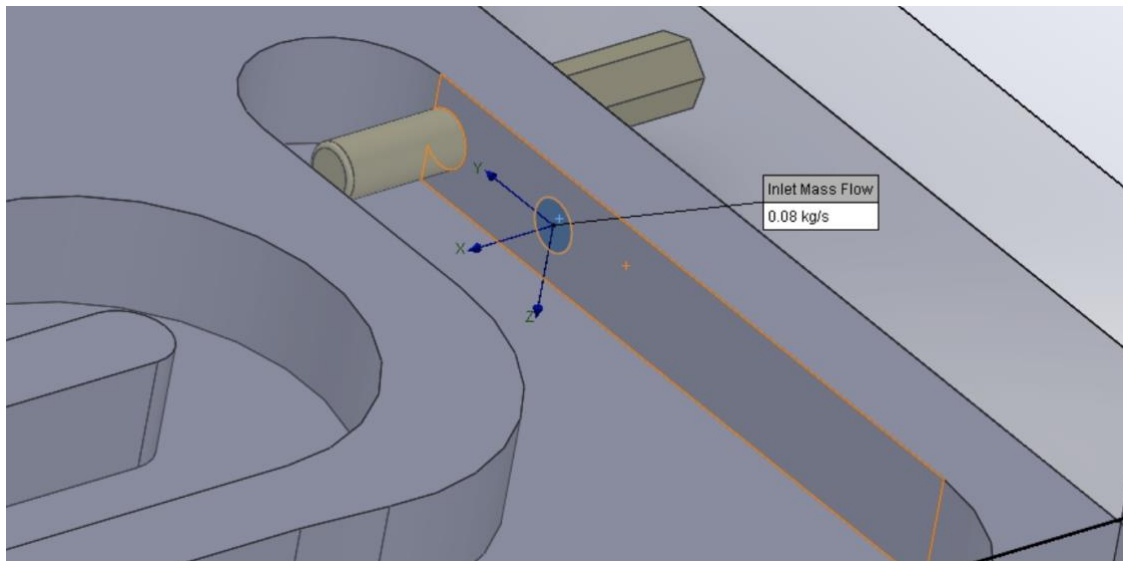


Figura 40. Definición de condiciones de frontera de estudio 1, gasto másico.

También se realizó el mallado básico basado en malla rectilínea y capa de contorno.

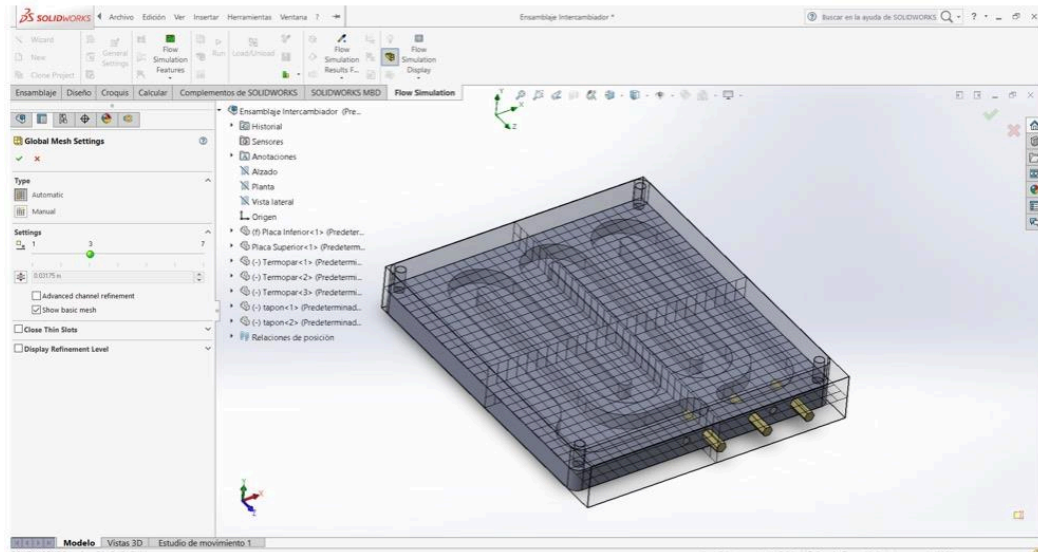


Figura 41. Mallado del modelo total del intercambiador, en análisis 1.

Se definieron lo que SolidWorks llama metas globales «Global Goals» que básicamente son los parámetros físicos a calcular en todo el dominio computacional, que es el cuadro que engloba todo el volumen de fluido y/o sólido donde se resuelve la solución, que en este proyecto fueron la temperatura en Sólido y Fluido, y esto se realiza porque estamos interesados principalmente en observar cómo se comporta la transferencia de calor en nuestra placa de intercambiador. Para esto se da clic derecho en Goals, Insert Global Goals y se seleccionan las metas de Min, Avg, y Max de Temperatura en Solido y de Fluido.

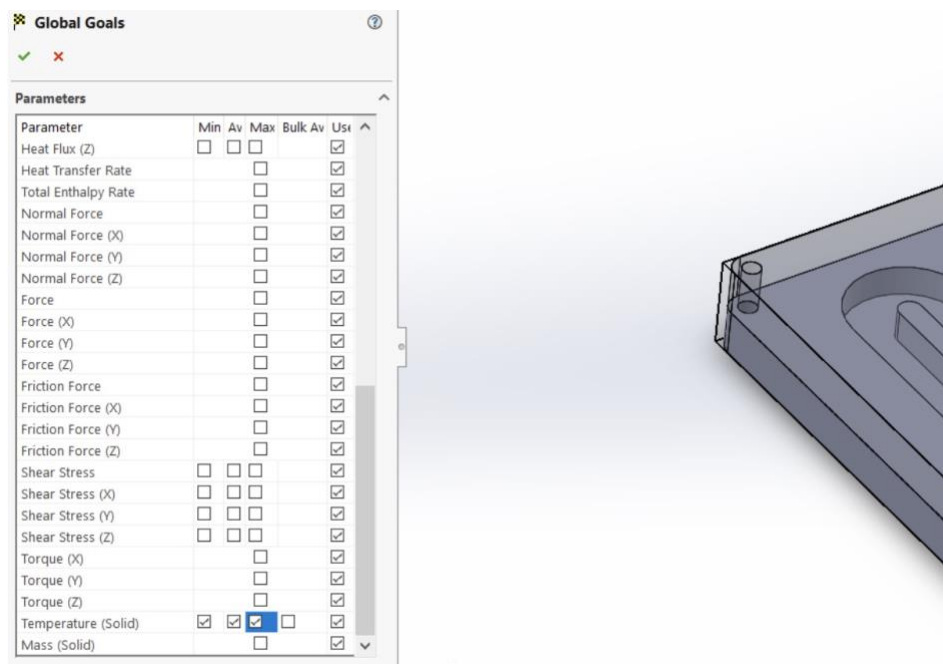


Figura 42. Metas globales «Global Goals», parámetros a calcular, en análisis 1.

La correcta utilización de los «Global Goals» asegura la rapidez, estabilidad y convergencia de los resultados en una simulación.

Posteriormente para comenzar la simulación se dio clic en «Run» o «Correr el Estudio». La rapidez con la que se resuelva el proceso depende de las características de la computadora en que se esté haciendo, a mayor capacidad de la máquina más rápido se podrá resolver el estudio, por ser un estudio transitorio y con las características que se incluyeron este estudio es pesado y por lo tanto su solución puede demorarse. Con las características de nuestro equipo el estudio 1 tardó 13 horas en completarse para hacer 10 segundos de simulación.

Se utilizó la herramienta «cut plots» esta herramienta permite hacer un corte en el sólido y en el fluido para observar cómo se comporta la temperatura (u otros parámetros) al nivel en el que está hecho ese corte, para utilizarla se da clic derecho en «cut plots», «insert» y al momento de aparecer la ventana de cut plot se selecciona el plano de referencia para hacer el corte.

Como se puede observar en la imagen «cut plot» realiza el corte de la pieza mostrando el fluido que pasa por en medio del canal, así mismo muestra las temperaturas del fluido a su paso por la placa en forma de una escala de colores de acuerdo a la tabla del lado izquierdo, la temperatura máxima alcanzada por el fluido fue de 73.92 °C, así como una temperatura mínima del fluido fue de 30 °C la cual es la temperatura a la que el fluido entra al intercambiador.

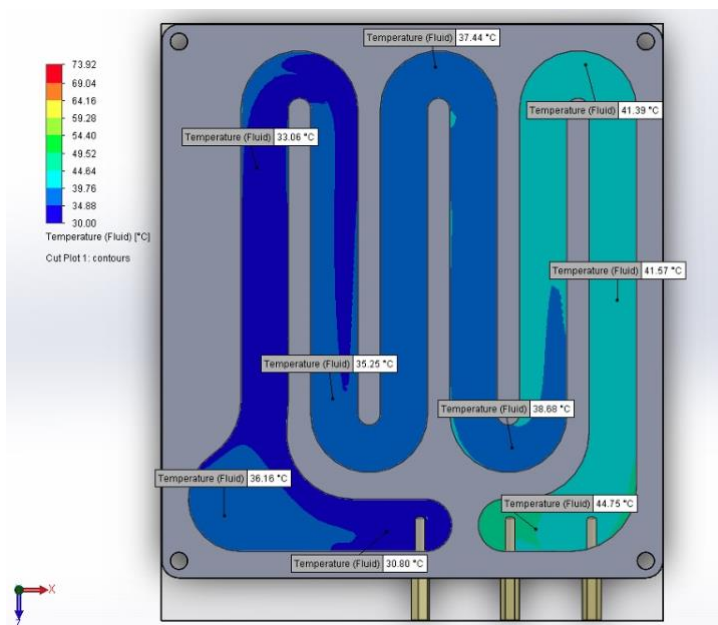


Figura 43. Uso de herramienta «Cut Plots» para observar distribución de temperaturas sobre el fluido, en análisis 1.

Encontrando temperaturas de fluido a la entrada del intercambiador de 30°C hasta llegar a temperaturas de 54.40°C a la salida del intercambiador.

Utilizando la herramienta «Surface Plots» pudimos visualizar la distribución de temperatura sobre las superficies de los sólidos. Como puede observarse, la temperatura a lo largo de la placa varia en un amplio rango, como lo marca la tabla a la izquierda del modelo el rango de temperatura a la mitad del intercambiador, en el segundo 10 del estudio va desde los 32.54 °C hasta un máximo de 83.35 °C en su punto de temperatura más alto registrado, como se puede observar los lugares donde el intercambiador se mantiene más caliente es tendiendo a las orillas de la pieza y en el lado izquierdo de la misma, en cambio las zonas donde pasa el fluido son las que presentan temperaturas más bajas.

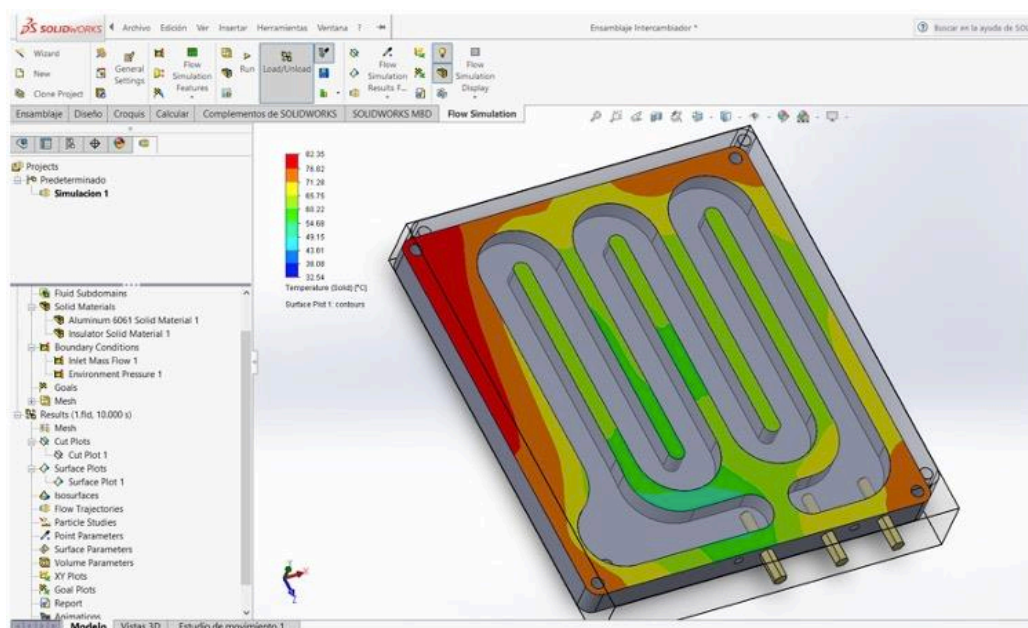


Figura 44. Uso de herramienta « Surface Plots » para observar distribución de temperaturas sobre sobre las superficies de los sólidos, en análisis 1.

Colocando probetas se puede apreciar con más exactitud las diferentes temperaturas que arroja el modelo, llegando a temperaturas de por ejemplo 59.68 °C en el centro del intercambiador al nivel del corte, y teniendo temperaturas que van de los 72.12 °C a los 79.61 °C en las orillas, Figura 45. Para la superficie del intercambiador, que es donde va acoplado el controlador, se utilizó también la herramienta de «Surface Plot», como se pueden observar temperaturas que van desde los 65.07°C en el centro de la pieza hasta los 74°C acercándonos a las orillas de la placa, con una máxima de 81.19°C registrada en la esquina izquierda superior de la placa, Figura 46.

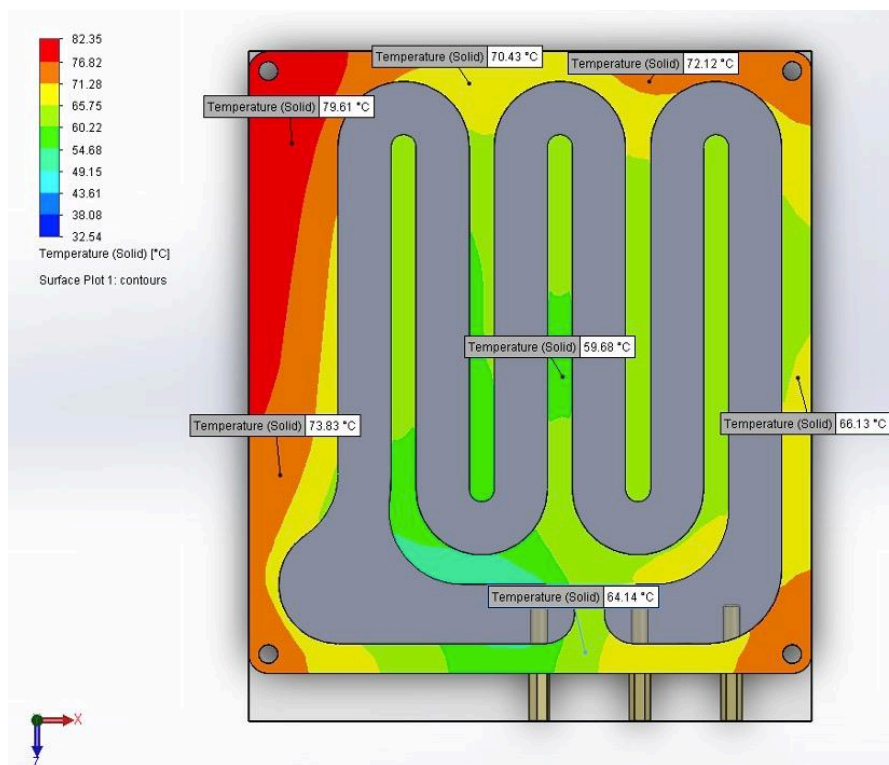


Figura 45. Uso de herramienta « Probe » para observar valores puntuales de temperaturas, en análisis 1.

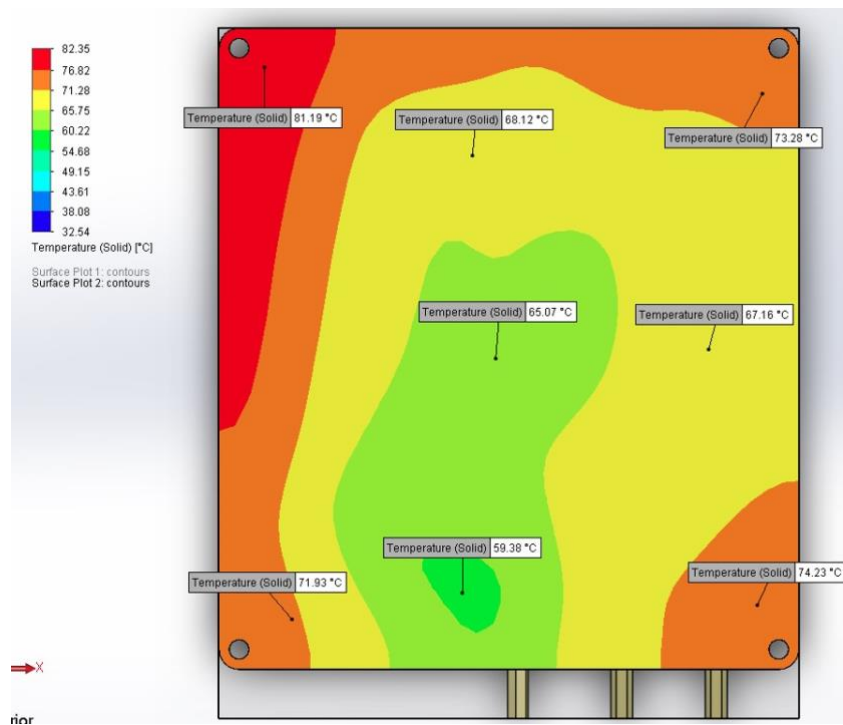


Figura 46. Distribución de temperaturas y valores puntuales sobre base de controlador, en análisis 1.

Para visualizar la trayectoria del fluido, al mismo tiempo que su temperatura a través del intercambiador se utilizó la herramienta «Flow trajectories», la cual resulta de gran utilidad para observar cómo es que se comporta el fluido, donde presenta velocidades mayores, donde presenta velocidades menores, estancamientos y turbulencias, así como la evolución de su temperatura.

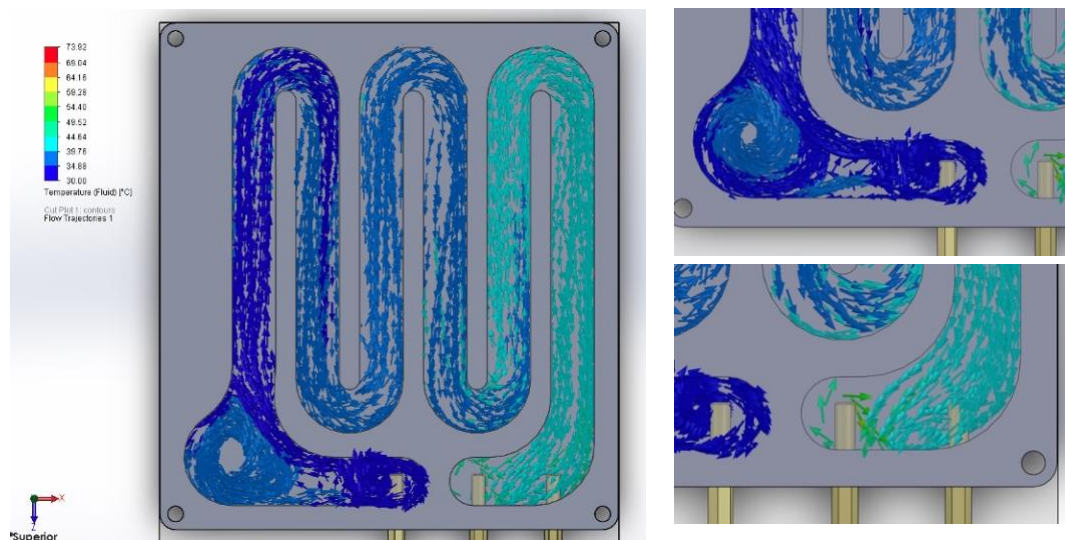


Figura 47. Trayectorias de flujo con escala de colores que representa distribución de temperatura en fluido, usando « Flow trajectories », en análisis 1.

En el capítulo de resultados se detallarán los resultados de estos estudios, así como la evolución en el tiempo de los parámetros de interés.

3.5.2 Análisis 2.

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90°C
Temp. del Ambiente:	30°C
Temp. de Líquido:	30°C
Temp. Aplicada Sobre Placa:	90°C

Para el segundo análisis las variables de temperatura seguirán siendo las mismas que en el primer análisis, temp. inicial del sólido 90 °C, temp. ambiente y temp. de líquido 30 °C, una variable importante que se agrega a las condiciones de este estudio es que en esta ocasión se aplica una carga térmica externa de 90 °C que mantiene esta temperatura constante sobre la cara superior del intercambiador, simulando que el controlador sigue produciendo calor durante en análisis el cual afecta a la placa y a todo el intercambiador, estos 90 °C aplicados simulan el calor que está generando el controlador cuando se está usando.

A diferencia del estudio 1, en el estudio 2 en las condiciones frontera la carga de calor externa de 90 °C sobre la tapa superior del intercambiador, para agregarla se da clic derecho sobre «boundary conditions» y se da clic en «Insert Boundary Conditions», seguido, en la ventana que aparece se elige el tipo de condición «Wall», «Outer Wall» y en los parámetros se le da un valor de Temperatura de 90 °C, por último, se selecciona la cara sobre la que se aplicará esta carga térmica, la cara superior del ensamble, figura 48.

Una vez realizados los pasos anteriores, se procede a correr la simulación, ahora con los nuevos parámetros, en este análisis el tiempo que tardó la computadora en procesarlo fue de 13 horas con 40 minutos, recordando que a mayor capacidad de la computadora menor será el tiempo que se tarde en correr la simulación.

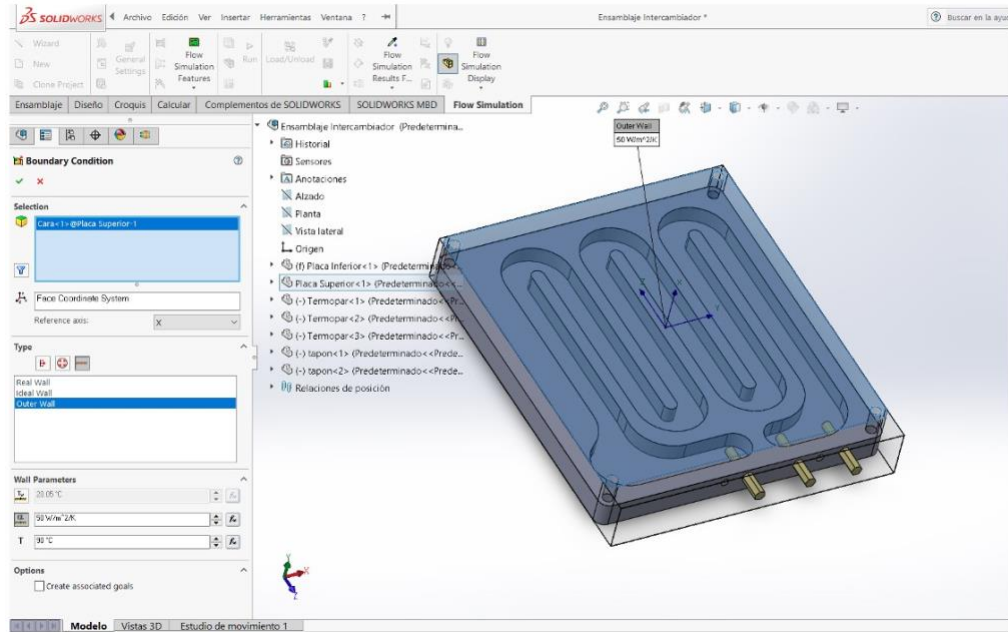


Figura 48. Herramienta «Outer Wall» agrega temperatura de 90 °C.

Para la temperatura del fluido se puede observar que está entre los rangos de 74 °C y 30 °C, alcanzando máximos de 60 °C a la salida del intercambiador en el segundo 10 y un mínimo de 30 °C a la entrada del intercambiador. Colocando probetas sobre el fluido se puede observar cómo es que este va aumentando su temperatura al ir pasando a lo largo de la trayectoria del intercambiador.

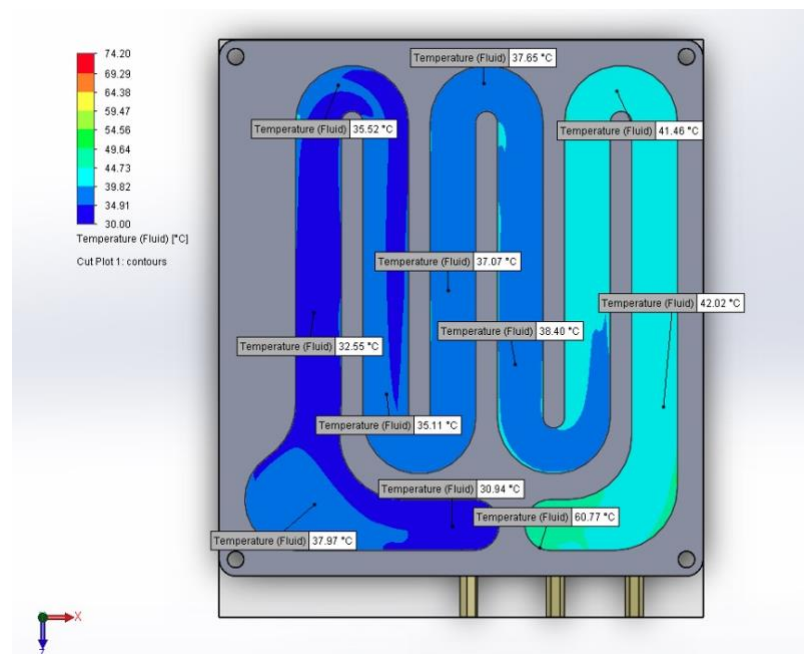


Figura 49. Temperaturas del fluido dentro del intercambiador en el segundo 10, en análisis 2.

Como se observa se leen temperaturas del fluido de 30.94°C a la entrada hasta llegar a los 60.77°C a la salida del intercambiador.

La temperatura del sólido a mitad del intercambiador muestra el rango de temperaturas desde los 32.57°C hasta los 82.86°C , como puede observarse las zonas donde más se concentra el calor es en las orillas de la placa, en cambio las zonas de menor temperatura son por donde pasa el fluido, en el centro del intercambiador.

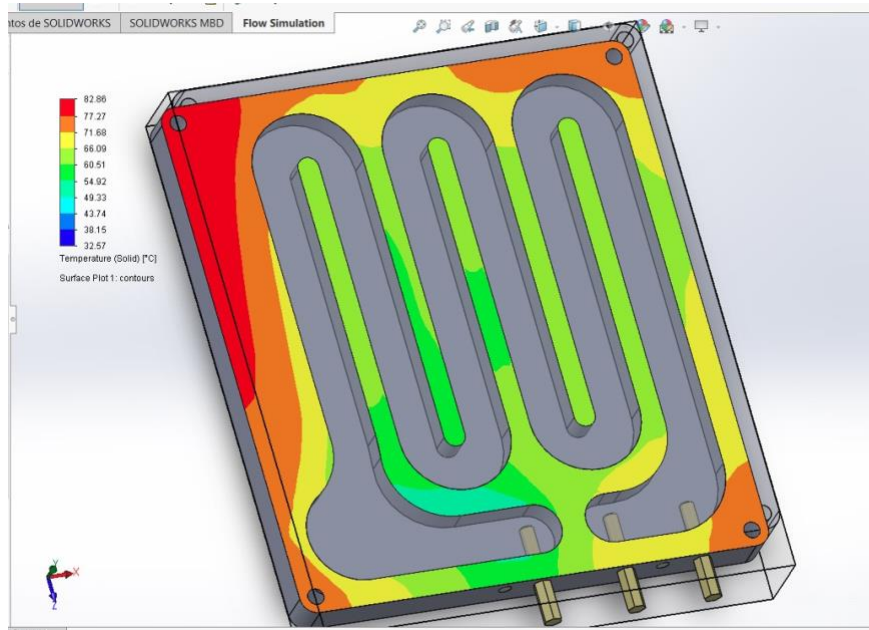


Figura 50. Temperaturas del sólido a la mitad del intercambiador en el segundo 10, en análisis 2.

Colocando probetas sobre la superficie se pueden observar las diferentes temperaturas a lo largo de la superficie, en las esquinas se observan las mayores temperaturas: 81.36°C , 73.46°C , 73.76°C y 72.09°C en cambio en el centro de la placa se pueden observar temperaturas de 59.98°C , 62.02°C y 62.93°C , figura 51.

Se midió la temperatura sobre la superficie del intercambiador donde va acoplado el controlador del EV, como se puede observar temperaturas en el rango de los 60°C a los 82.86°C , cabe recordar que sobre esta tapa se colocó una temperatura de 90°C la cual simula el calor generado por los componentes del controlador, aquí se puede observar cómo en el segundo 10 después de que el fluido pasa por dentro del intercambiador la temperatura sobre esta tapa llega hasta máximos de 82°C lo cual indica que el sistema está funcionando ya que está bajando la temperatura, figura 52.

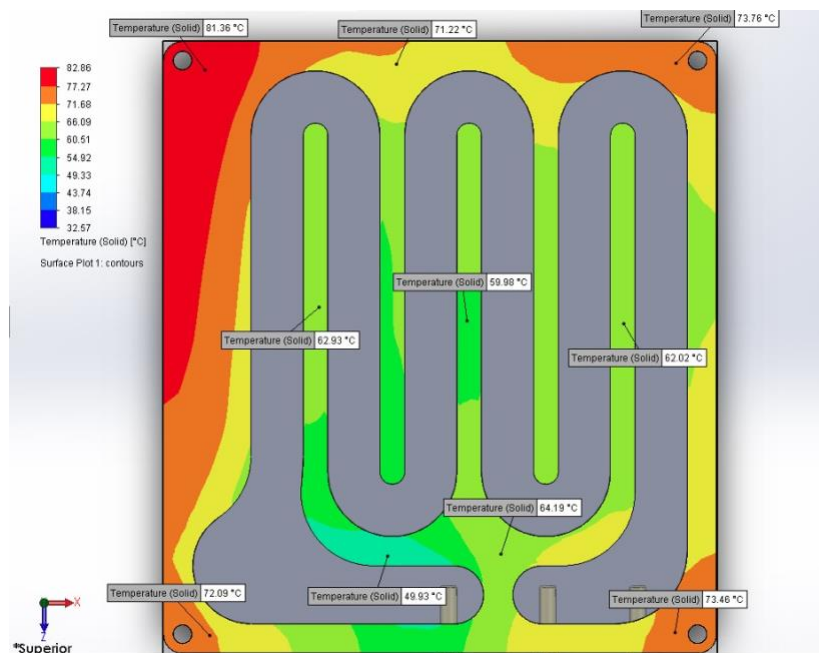


Figura 51. Temperaturas del sólido a la mitad del intercambiador medida con probetas, segundo 10, en análisis 2.

Colocando probetas sobre la superficie se puede observar cómo aumenta la temperatura a medida que se aleja del centro, registrando 65.59°C en el centro de la placa y aumentando hasta llegar a los 74°C en las esquinas de la tapa y 81.06°C en la esquina superior izquierda de la tapa.

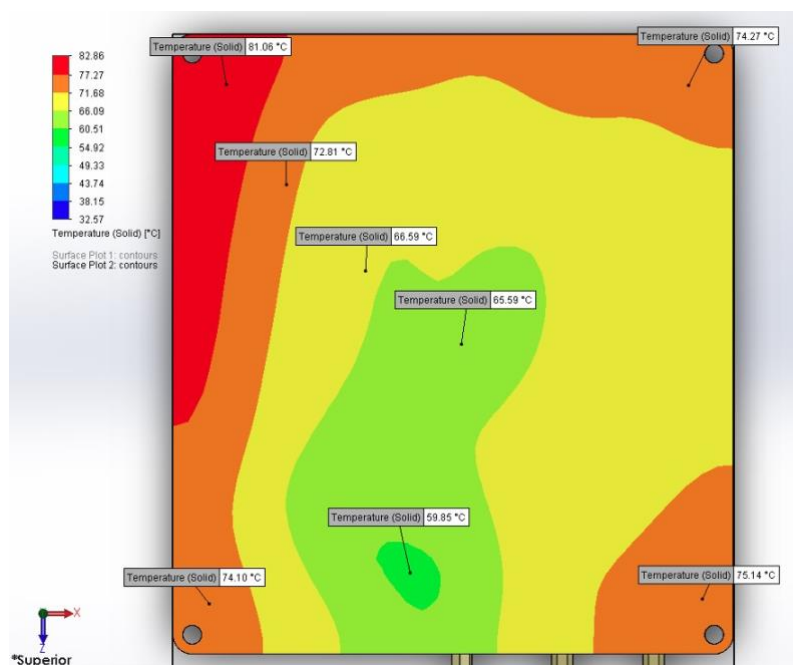


Figura 52. Temperaturas del sólido sobre la superficie superior en el segundo 10 medida con probetas, en análisis 2.

Haciendo un corte transversal de la placa justo por encima del conducto del fluido, se pueden observar las temperaturas que van desde los 81.73 °C en las esquinas hasta los 60.06 °C en las partes centrales, figura 53. De igual forma se generó la trayectoria del flujo, figura 54.

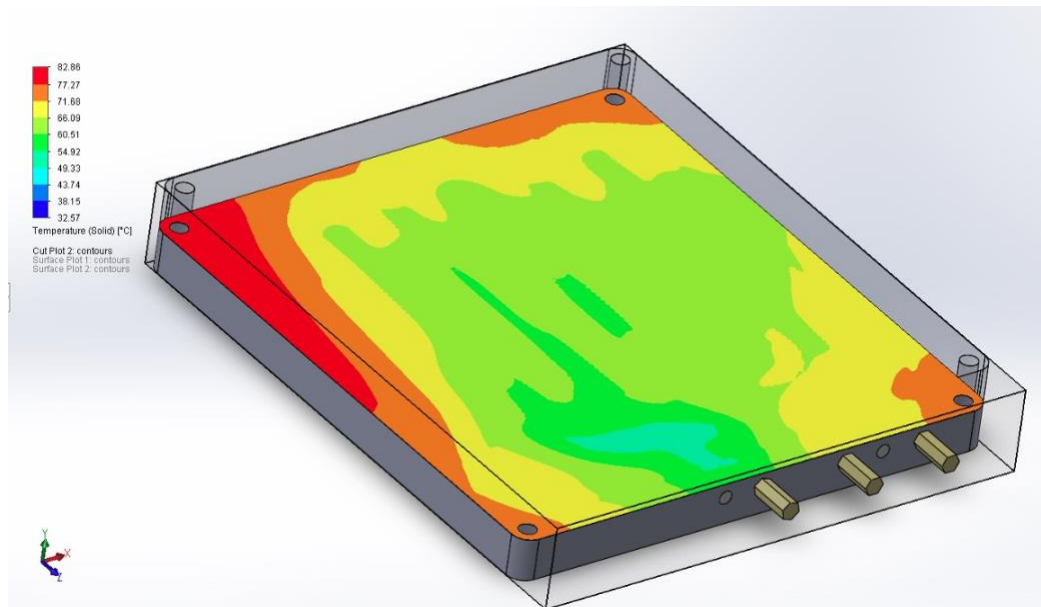


Figura 53. Temperaturas del sólido medida por encima del ranurado en el segundo 10, en análisis 2.

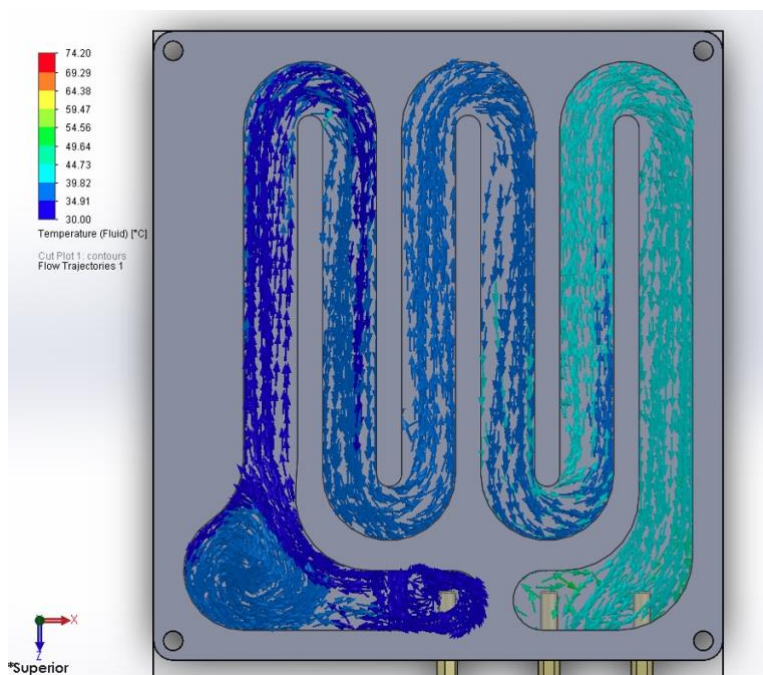


Figura 54. Trayectoria del fluido por dentro del intercambiador, en análisis 2.

3.5.3 Análisis 3.

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90 °C
Temp. del Ambiente:	30 °C
Temp. de Líquido:	NO CIRCULA LIQUIDO
Temp. Aplicada Sobre Placa:	NO SE APLICA TEMPERATURA SOBRE PLACA

Enfriamiento del intercambiador por convección de manera natural en el ambiente a 30 °C.

La tercera simulación realizada al intercambiador en este estudio, al igual que el pasado, será un estudio de control, con el cual se pretende observar diferencias y hacer un comparativo con los estudios anteriores.

Para realizar este estudio se colocó una temperatura inicial de sólido del intercambiador de 90 °C, la temperatura ambiente será la misma que en estudios pasados, es decir, 30 °C, en este estudio no se hará circular líquido por dentro del intercambiador, tampoco se aplicará una temperatura sobre la tapa de la placa superior del intercambiador como se hizo en estudios pasados, el objetivo de este estudio es observar cómo es que el ensamble del intercambiador disipa el calor de manera natural en el ambiente, durante los 10 segundos que durará el análisis transitorio del estudio.

Aquí se comienza por hacer el nuevo estudio, no se repetirán los pasos de cómo establecer el estudio para no caer en repeticiones, solo se mencionarán los pasos más importantes que hacen diferente a este estudio con respecto de los anteriores.

Una vez dentro del nuevo estudio se deben de cambiar los parámetros requeridos, dando clic derecho sobre «input data», «general settings», en la ventana de «General Settings» se revisan los parámetros de Temperatura Ambiental que debe estar a 30 °C y el de Temperatura Inicial del Sólido de 90 °C.

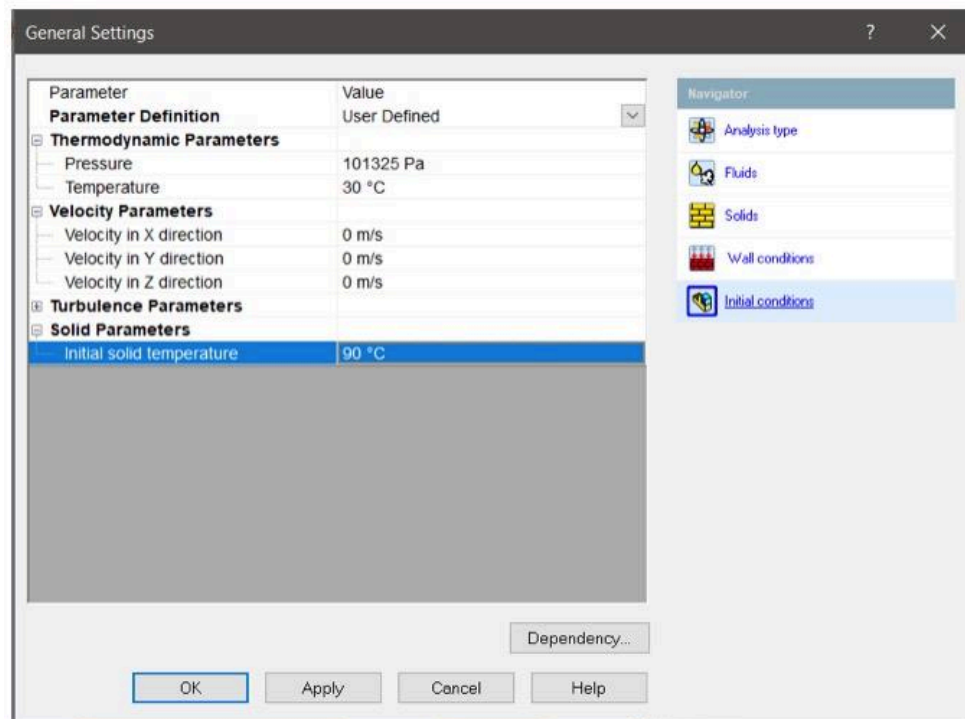


Figura 55. Parámetros generales del análisis 3.

Después se modificó los parámetros que hacen la diferencia en este estudio, es decir desde las «Boundary Conditions» se modifica el flujo de líquido que entra a un valor tan bajo que es prácticamente cero, y no se coloca la carga térmica de 90 °C sobre la tapa superior del intercambiador que se aplicó en el estudio anterior.

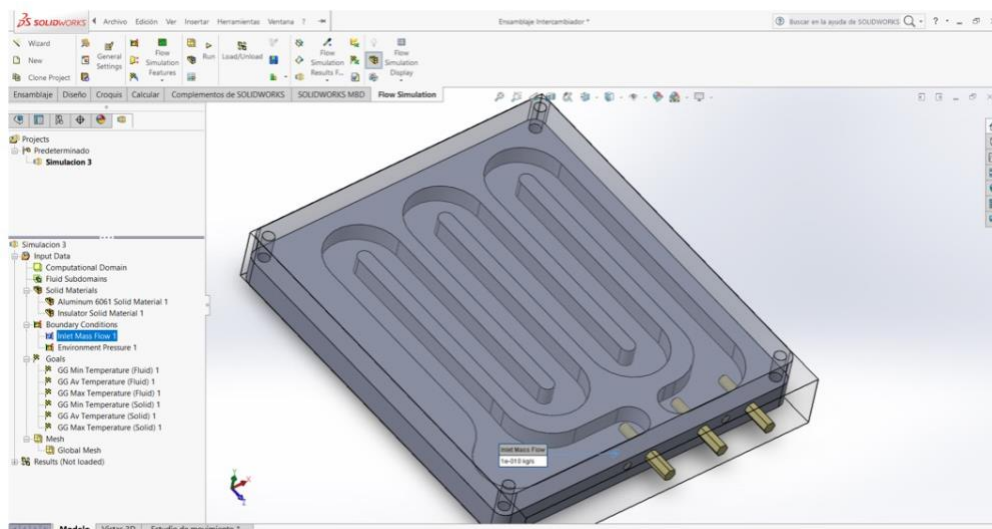


Figura 56. Modificación de valor de flujo de entrada en análisis 3.

Con los nuevos parámetros ya establecidos se procede a correr la simulación, en tiempo, este estudio fue mucho más corto que los estudios que involucran fluido corriendo por dentro del intercambiador.

En este estudio, en el que no pasa fluido por dentro del intercambiador y en el cual se deja al sólido enfriarse mediante convección natural desde los 90°C en un ambiente a 30°C se puede observar que después de haber transcurrido 10s las temperaturas en el sólido del intercambiador han bajado, en el centro del intercambiador se puede medir una temperatura de 78.88°C mientras que en las orillas la temperatura ha bajado llegando a registrar temperaturas de 80.88°C hasta 85.55°C, figura 57.

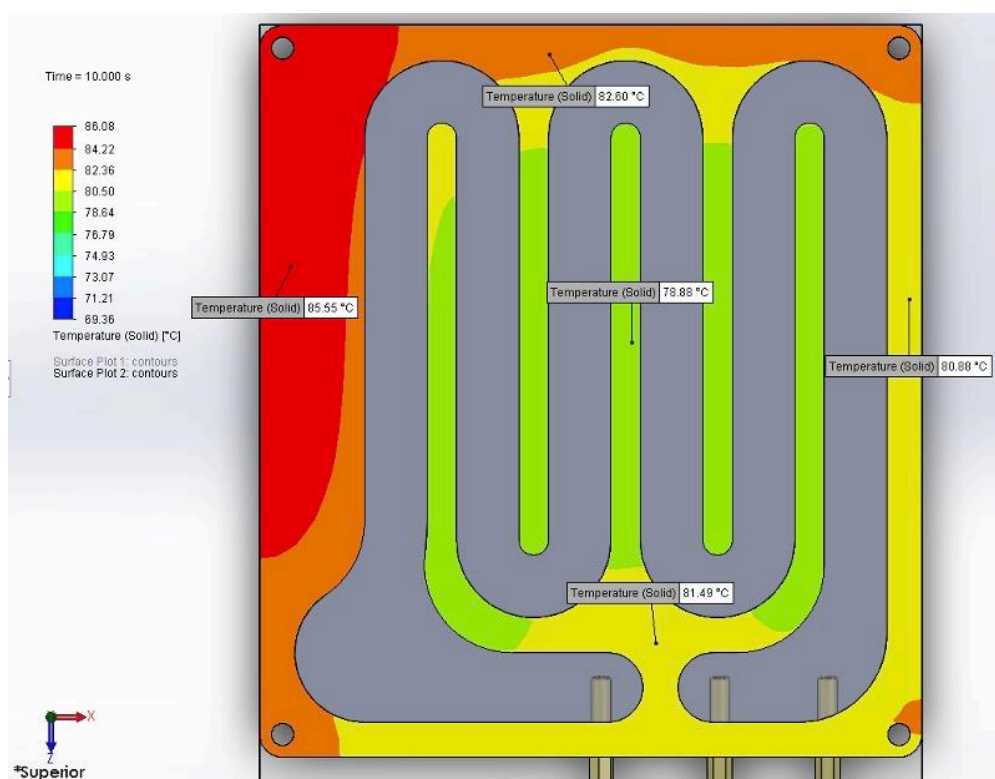


Figura 57. Temperaturas registradas a mitad del intercambiador en el Segundo 10, en análisis 3.

Resultados en placa superior, en este caso no se aplica la temperatura que genera el controlador como en el estudio anterior se aplicó la carga térmica de 90 °C, figura 58.

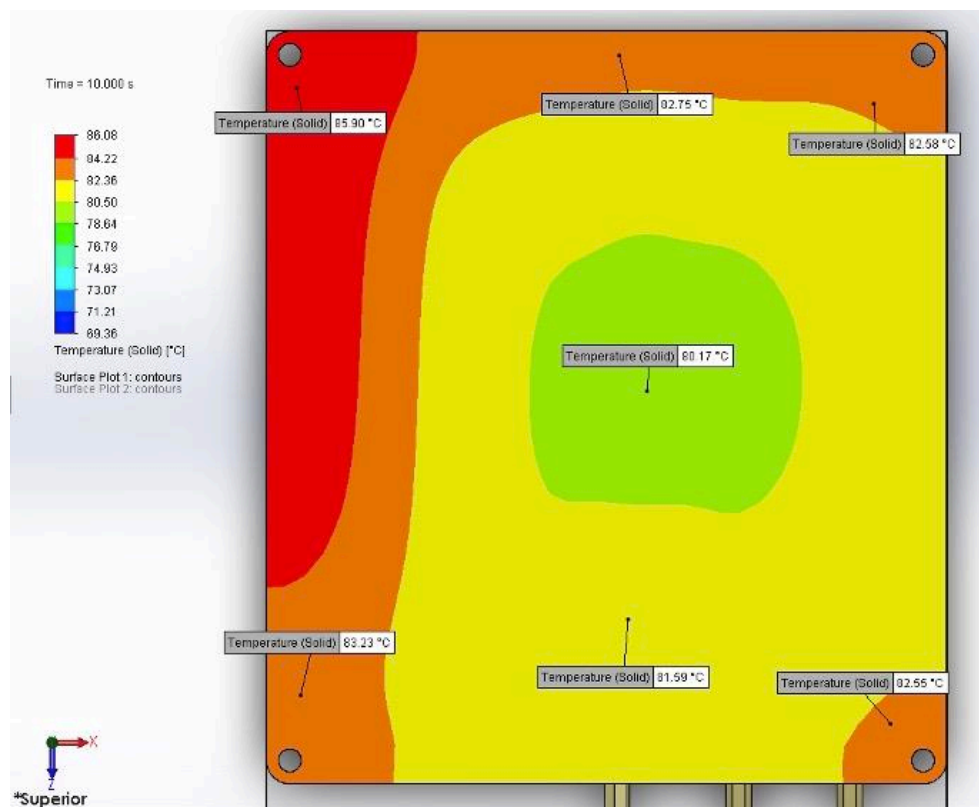


Figura 58. Temperaturas registradas sobre corte de placa superior justo por encima del ranurado segundo 10, en análisis 3.

Como se observa se obtienen mediciones en el centro de la tapa de 80.17°C, se registran 85.90°C hacia el extremo izquierdo superior de la placa y 82.55°C en el extremo derecho inferior de la placa.

Comparando con mediciones del estudio 1 se puede ver también aquí como el flujo del fluido es un factor importante en la disipación de calor en el intercambiador.

3.5.4 Análisis 4.

Condiciones de Análisis:

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90 °C
Temp. del Ambiente:	30 °C
Temp. de Líquido:	NO CIRCULA LIQUIDO
Temp. Aplicada Sobre Placa:	90 °C

Cuarto y último análisis realizado, en este análisis se aplica una temperatura de 90 °C sobre la tapa superior del intercambiador, calor generado por el controlador, también se parten de las condiciones iniciales de temp. inicial del sólido de 90 °C y temp. del ambiente de 30 °C, la diferencia para este análisis es la de que no se circulará fluido por dentro del intercambiador, esto con la finalidad de ver cómo es que el fluido afecta en el retraso del calentamiento del intercambiador, o dicho de otra manera como es que el fluido ayuda a sacar parte del calor generado por el controlador, que dicho de paso es el objetivo de este proyecto.

Para realizar este estudio se crea un nuevo estudio basándose del estudio 2 con la diferencia de que en la variable del fluido de entrada se da un valor de fluido muy bajo, despreciable, ya que, si se elimina por completo el fluido de entrada, dejándolo en cero el valor, el programa Flow Simulation no procesa el análisis y marca error. El tiempo de la simulación como puede observarse fue mucho más corto.

Parameter	Value
Status	Solver is finished.
Cells	130,140
Fluid cells	51,760
Solid cells	78,380
Partial cells	38,370
Iterations	10
Last iteration finished	18:41:37
CPU time per last iteration	00:00:06
Travels	0.0443536
Iterations per 1 travel	225
Cpu time	0 : 1 : 13
Calculation time left	0 : 0 : 0
Physical time	10 s
Run at	DESKTOP-C0VVVLP

Event	Iteration	Time
Mesh generation started		18:39:54 , Jul 21
Mesh generation normally finished		18:40:20 , Jul 21
Preparing data for calculation		18:40:21 , Jul 21
Calculation started	0	18:40:28 , Jul 21
Calculation has converged since the fo...	9	18:41:37 , Jul 21
Max. phys. time is reached	9	
Calculation finished	10	18:41:43 , Jul 21

Figura 59. Tiempo de resolución del análisis 4 (1.13 minutos).

Una vez procesado el análisis, que es de menor duración por ya no tomar en cuenta la variable del fluido, se puede proceder a observar los resultados obtenidos en el segundo 10 de la simulación.

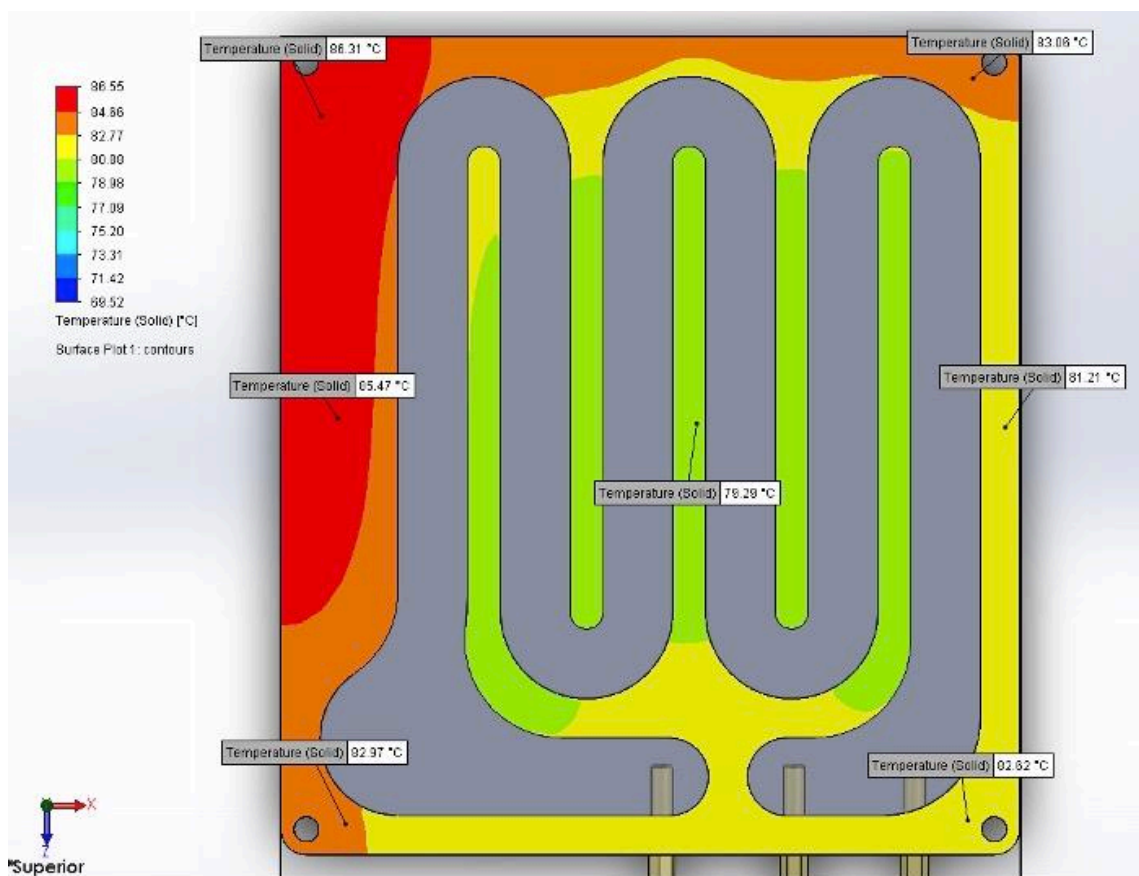


Figura 60. Temperaturas registradas en intercambiador en el segundo 10, en análisis 4.

El primer resultado que se observa es la placa a corte intermedio, donde se pueden observar las temperaturas que se alcanzaron, que van desde los 79.29°C en el centro hasta los 82.62°C a 86.31°C en las esquinas de la placa. En el rango de colores del lado izquierdo de la pantalla podemos ver que se alcanzaron valores máximos de 86.55°C y mínimos de 69.52°C durante el estudio.

4.-Se observan ahora los resultados de temperaturas sobre la tapa superior del intercambiador, donde se aplica el calor generador por el controlador, se pueden ver en el centro de la tapa temperaturas registradas de 80.84°C, las cuales van aumentando conforme se acerca a las orillas de la tapa, registrando en las orillas de 83.00°C a 86.41°C.

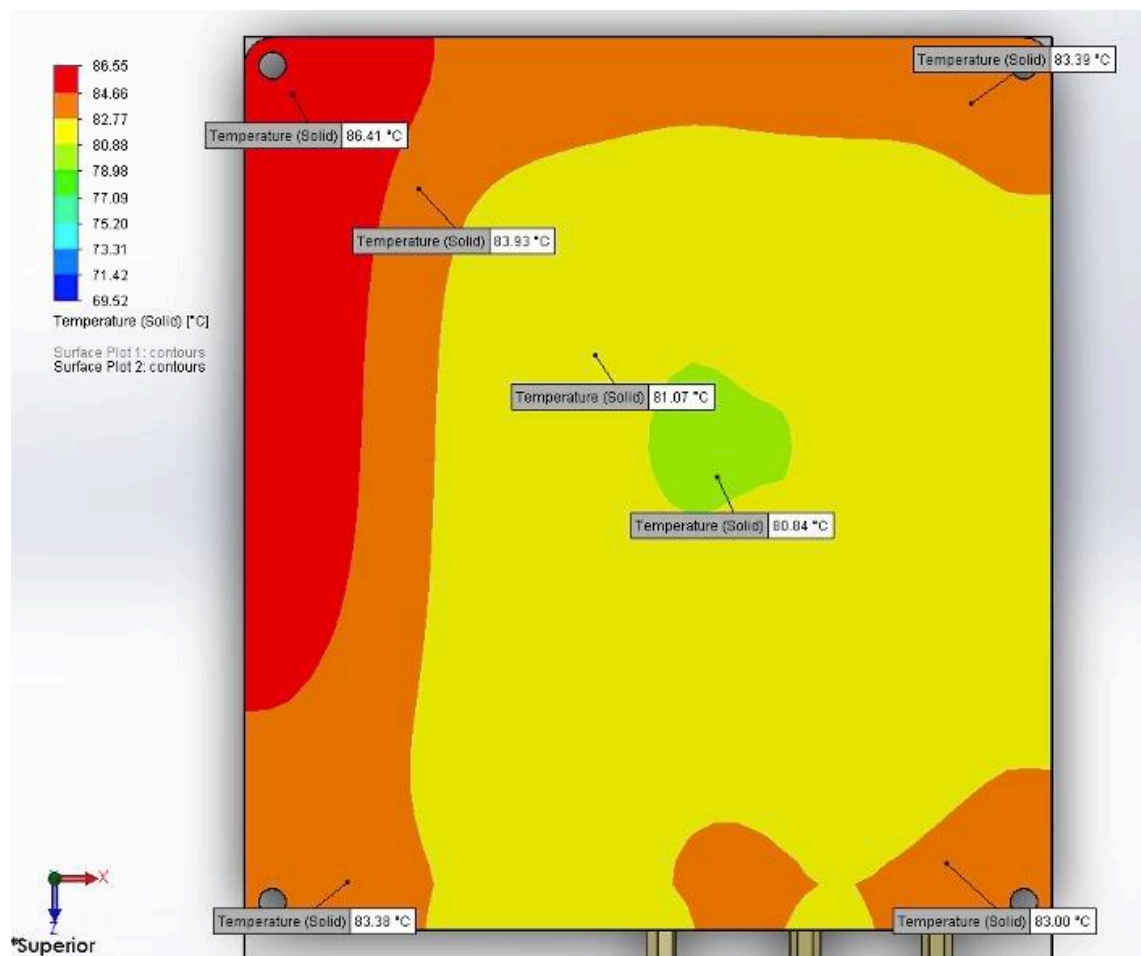


Figura 61. Temperaturas registradas sobre cara superior de intercambiador al segundo 10, en análisis 4.

RESULTADOS

En este capítulo se detallarán los resultados obtenidos de los cuatro análisis realizados en el prototipo virtual del intercambiador con Flow Simulation, se realizarán las comparativas entre los cuatro análisis para comprobar efectividad del modelo en su aplicación al intercambiador real que se utilizará en el vehículo, para resolver el problema de sobrecalentamiento en el sistema en respuesta transitoria de la temperatura.

4.1 Resultados análisis 1.

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90 °C
Temp. del Ambiente:	30 °C
Temp. de Líquido:	30 °C
Temp. Aplicada Sobre Placa:	No Aplicada

Los resultados que se arrojan son los obtenidos en el segundo 10 de la simulación, figura 62, es decir al final de la misma, pero también se puede observar que sucede en la simulación durante los 9 segundos anteriores para esto colocamos la visualización tanto de la temperatura del sólido como de la temperatura del fluido, se puede observar en la parte de arriba de la placa aparece un pequeño mensaje el cual dice Time = 10.00 s que quiere decir que se encuentra en el final de la simulación.

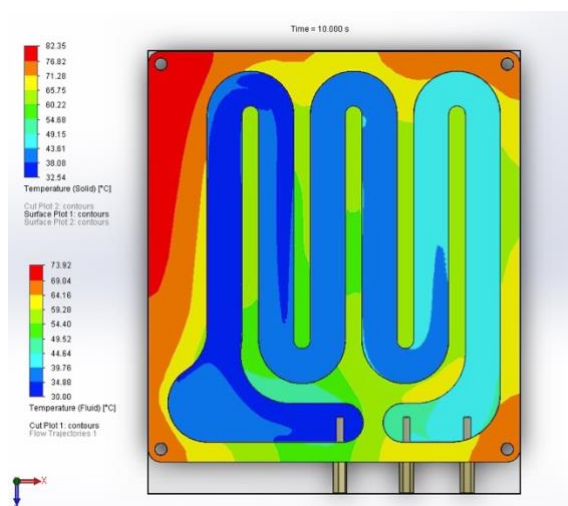


Figura 62. Intercambiador con temperatura de fluido y de solido en el Segundo 10, en análisis 1.

Si damos clic derecho en «Results» y después clic en « Load Time Moment» a continuación, aparecerá una tabla desplegada donde se selecciona que segundo o fracción del tiempo se quiere observar.

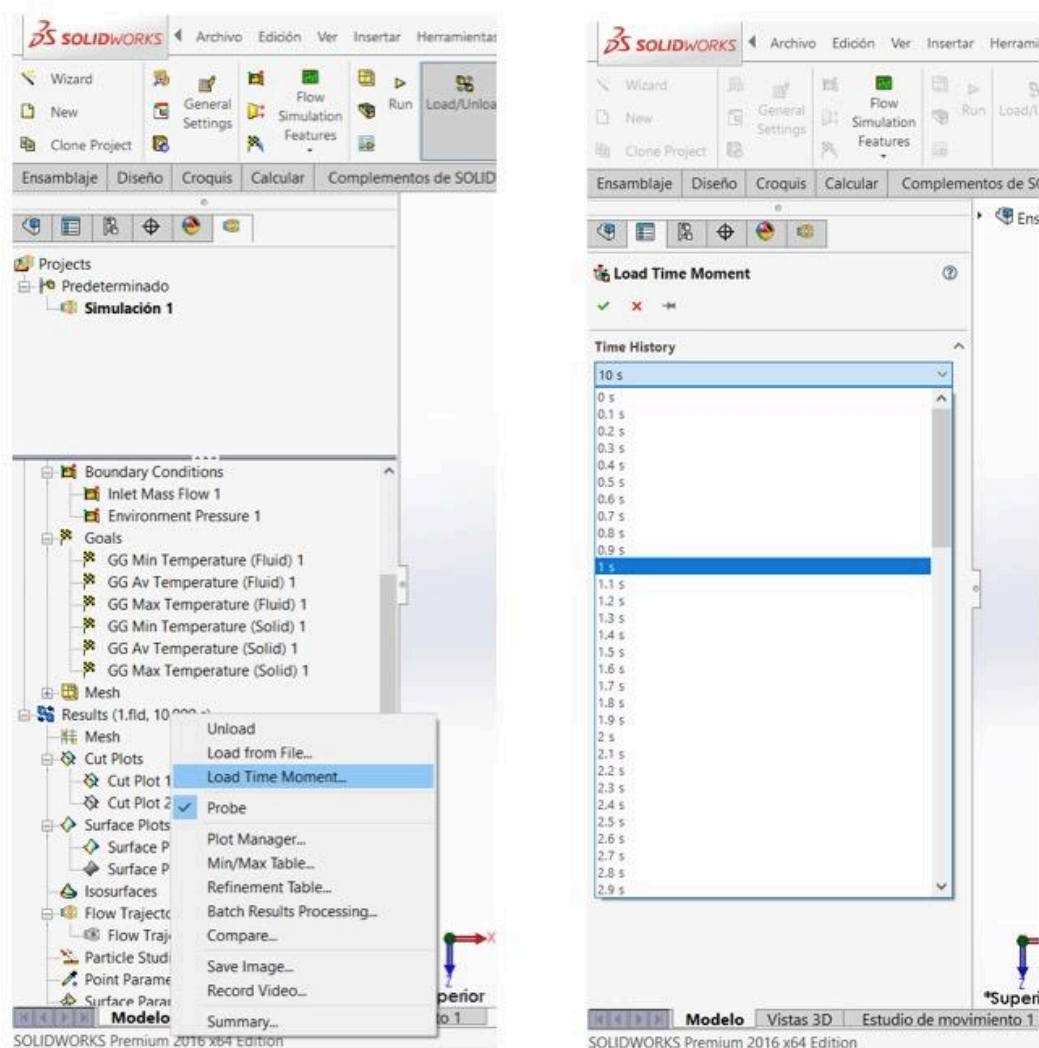


Figura 63. Herramienta «Load Time Moment» para seleccionar que segundo se desea observar.

En el segundo 0 $T = 0.00s$ lo que se puede observar es el sólido del intercambiador a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ como se puede ver toda la pieza se encuentra en rojo y el fluido se encuentra a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ en todo el trayecto porque aún no comienza la trayectoria del calor, figura 64.

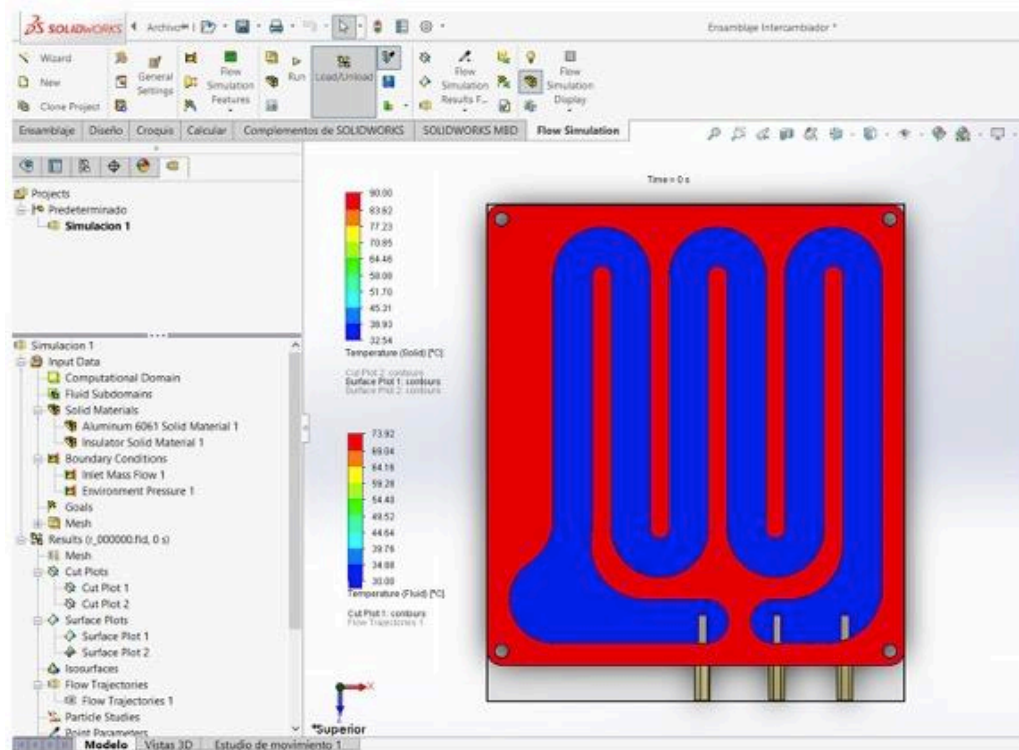


Figura 64. Vista de intercambiador en el segundo 0, en análisis 1.

Posteriormente a partir del segundo 1 se puede observar la transición de la temperatura en el modelo, como el líquido va subiendo su temperatura y así mismo cómo el sólido va disminuyendo su temperatura como se puede observar en el mosaico de la figura 65.

Se puede observar a partir de esta secuencia de la figura 65 como es que la temperatura del sólido va disminuyendo conforme pasa el tiempo y en cambio la temperatura del fluido va en aumento hasta que en los últimos segundos pareciera ser que están por alcanzar un equilibrio térmico.

En la figura 66 observamos la temperatura sobre la tapa superior del intercambiador, cómo evoluciona con respecto al paso del tiempo, recordando que esta tapa es la que se encuentra en contacto con el controlador del automóvil, el cual es el objetivo del intercambiador el bajar la temperatura generada por dicho controlador.

A partir de la secuencia se puede observar cómo es que baja la temperatura a lo largo de la placa, haciendo énfasis en el centro o en la entrada por donde circula el fluido las cuales son las zonas donde más baja la temperatura y de ahí hacia las

orillas, también se observa que en la zona de entrada del fluido la temperatura baja más que en otras zonas por mucho.

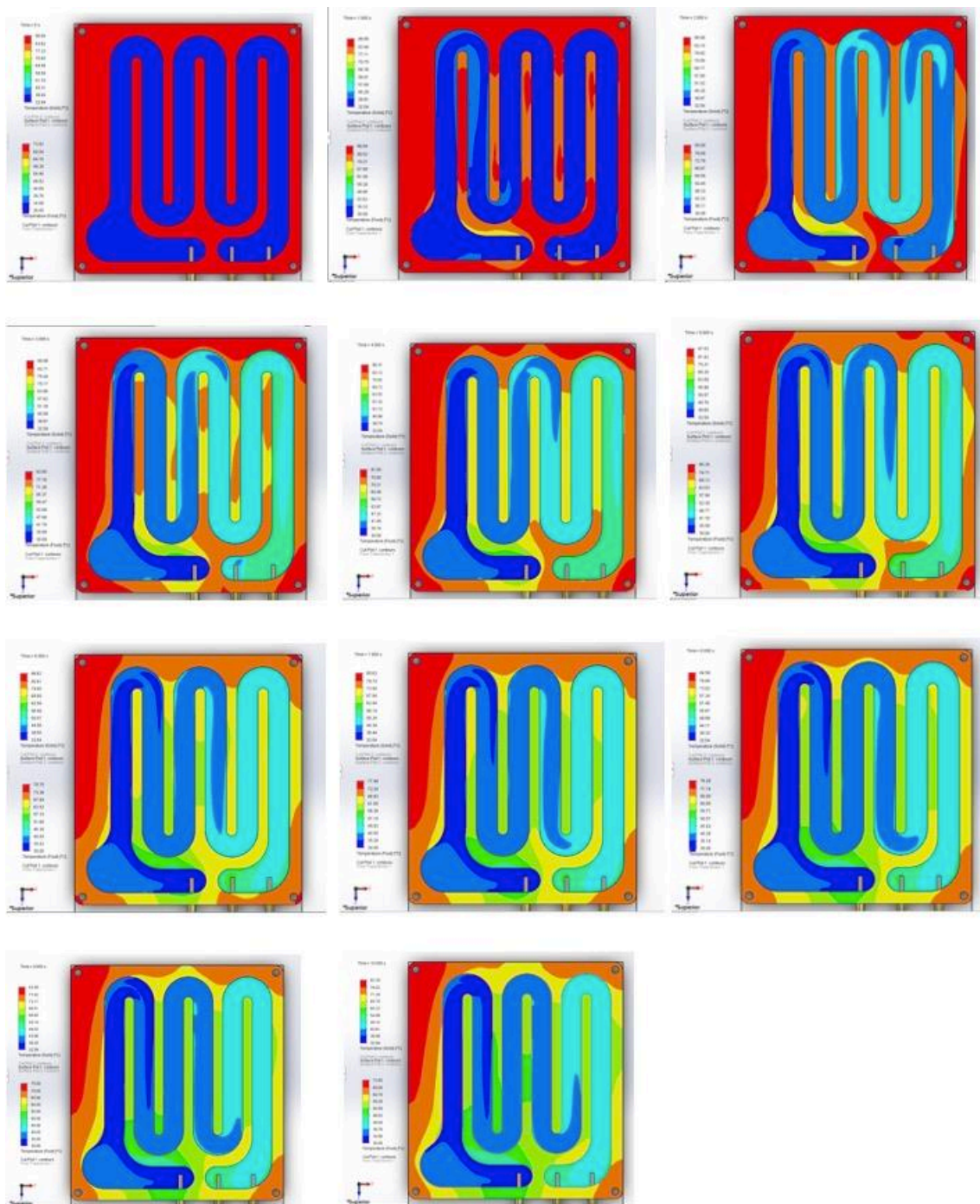


Figura 65. Evolución de la temperatura del intercambiador y el fluido desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 1.

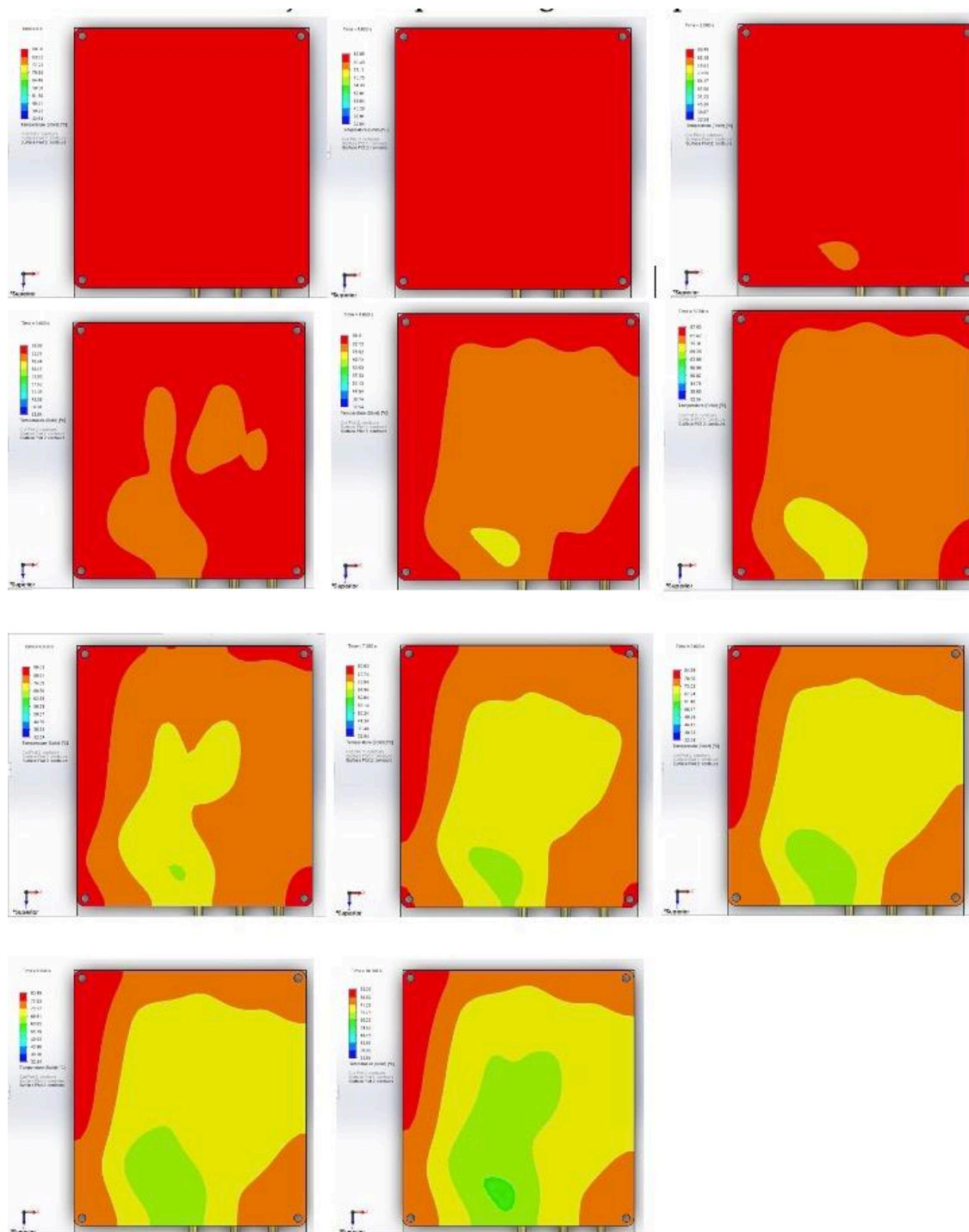


Figura 66. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 1.

Una vez terminado el análisis, Flow Simulation da la opción de graficar los resultados obtenidos, en este caso primero se obtiene la gráfica de temperatura promedio del fluido vs el tiempo físico, los 10 segundos en que transcurre la simulación, figura 67.

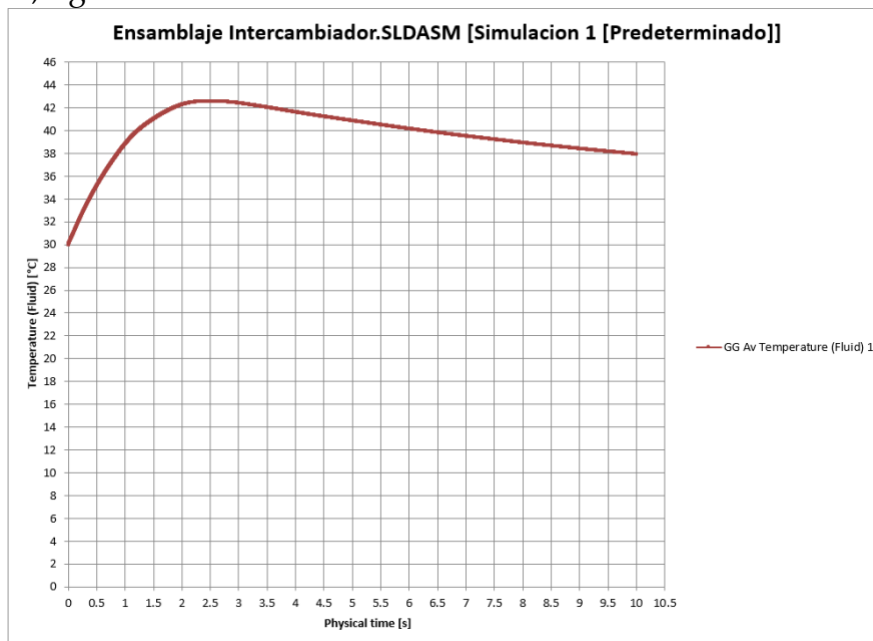


Figura 67. Gráfica de temperatura de fluido vs tiempo transcurrido, en análisis 1.

En esta primer gráfica figura 67, se puede observar la evolución de la temperatura del fluido, partiendo de los 30 °C iniciales del fluido se puede ver como aumenta del inicio al segundo 1 alcanzando los 38.80 °C y sigue aumentando hasta el segundo 2 alcanzando 42.26 °C, y un máximo de 42.57 °C en el segundo 3, a partir de ese momento la temperatura del fluido se vuelve más estable y comienza a descender lentamente en una pendiente dando resultados por ejemplo en el segundo 5 de 40.86 °C, segundo 8 de 38.90 °C hasta llegar al segundo 10 donde da resultados de 37.90 °C.

En la figura 68 se muestra la gráfica de temperatura promedio del sólido del análisis 1, sólido que consiste en la placa superior e inferior del ensamble del intercambiador, observando la gráfica se puede ver cómo es que la temperatura del sólido disminuye a partir del inicio del estudio, partiendo de los 90 °C cae en una pendiente llegando a los 83.23 °C en el segundo 2, a los 76.00 °C en el segundo 5 y llegando hasta los 66.57 °C en el segundo 10.

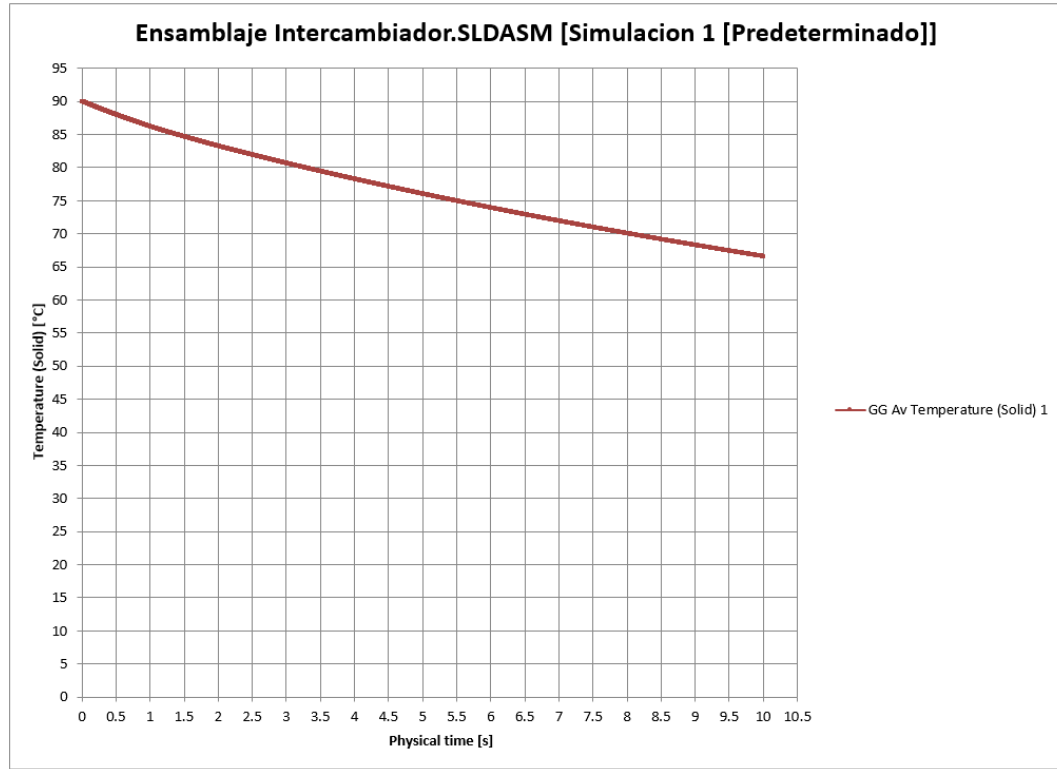


Figura 68. Gráfica de temperatura de solido vs tiempo transcurrido, en análisis 1.

4.2 Resultados análisis 2.

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90 °C
Temp. del Ambiente:	30 °C
Temp. de Líquido:	30 °C
Temp. Aplicada Sobre Placa:	90 °C

Tal como se realizó en el estudio anterior, en este estudio también se observará segundo a segundo cómo evoluciona la transferencia de calor a lo largo del intercambiador, como interactúan el fluido, la temperatura ambiente y la temperatura aplicada a la placa a lo largo del tiempo ya que es un estudio transitorio, desde el segundo cero hasta el segundo diez.

Las medidas se toman con ayuda de la herramienta «Load Time Moment»:

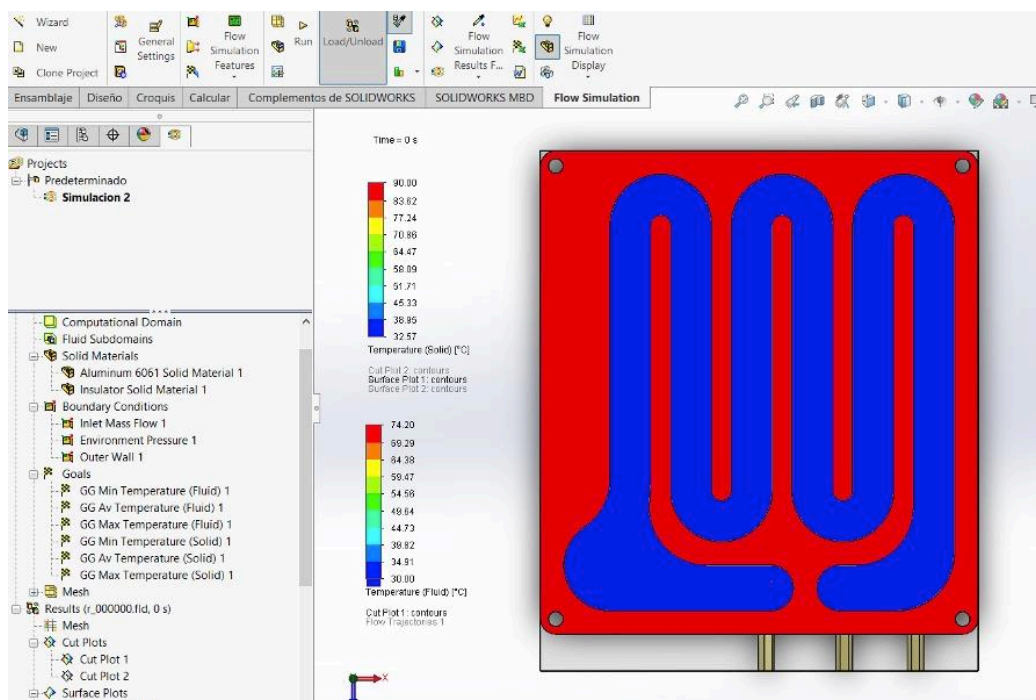


Figura 69. Temperaturas de sólido y fluido en el segundo 0, en análisis 2.

Se observa que el intercambiador internamente, en el segundo 0 se encuentra a la temperatura que se le dio al inicio del estudio, 90 °C, el fluido se encuentra a 30 °C, o su temperatura ambiente.

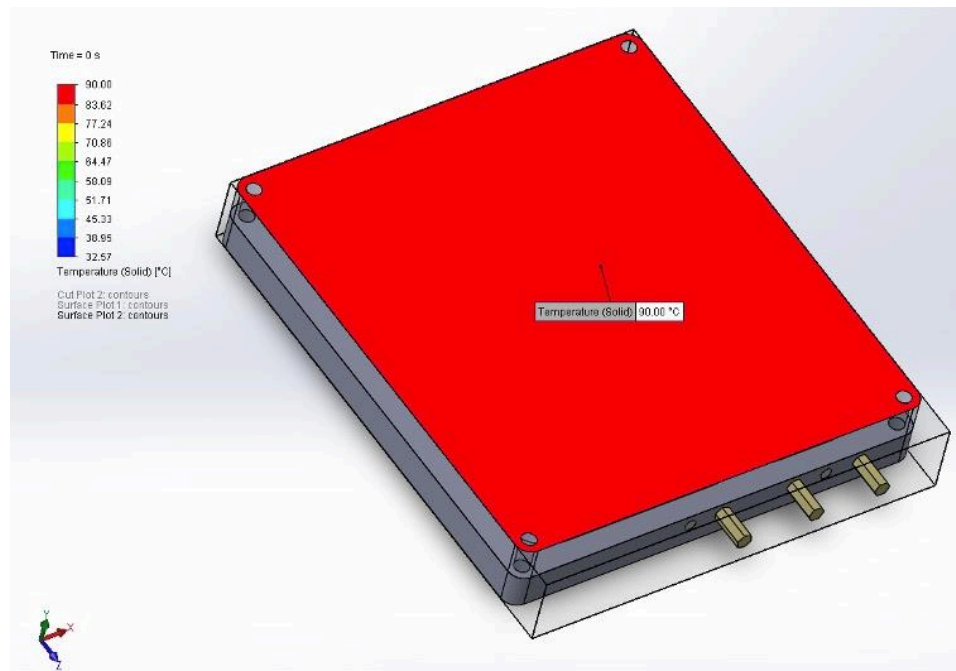


Figura 70. Temperatura de superficie superior de intercambiador en el segundo 0, en análisis 2.

Cómo se puede observar la tapa superior del intercambiador, donde va el controlador que se calienta se encuentra también a 90 °C.

Continuando ahora con el análisis transitorio, se observarán los cambios de temperatura a mitad del intercambiador partiendo desde el segundo cero hasta el segundo 10, se observará el intercambio de temperatura existente entre el fluido y la placa ranurada. Posteriormente, en el siguiente punto se observará el análisis transitorio, pero de la placa superior que es donde se conecta el controlador con el intercambiador y donde ocurre la inserción de la carga térmica, figura 71.

Se puede observar como a medida que el calor va creciendo en el intercambiador, el fluido a su vez va adquiriendo temperatura, se puede observar como el fluido va despejando calor de la placa a su paso por ella, a su vez el calor en el fluido se hace presente más cuando el fluido está a punto de salir de la trayectoria del intercambiador.

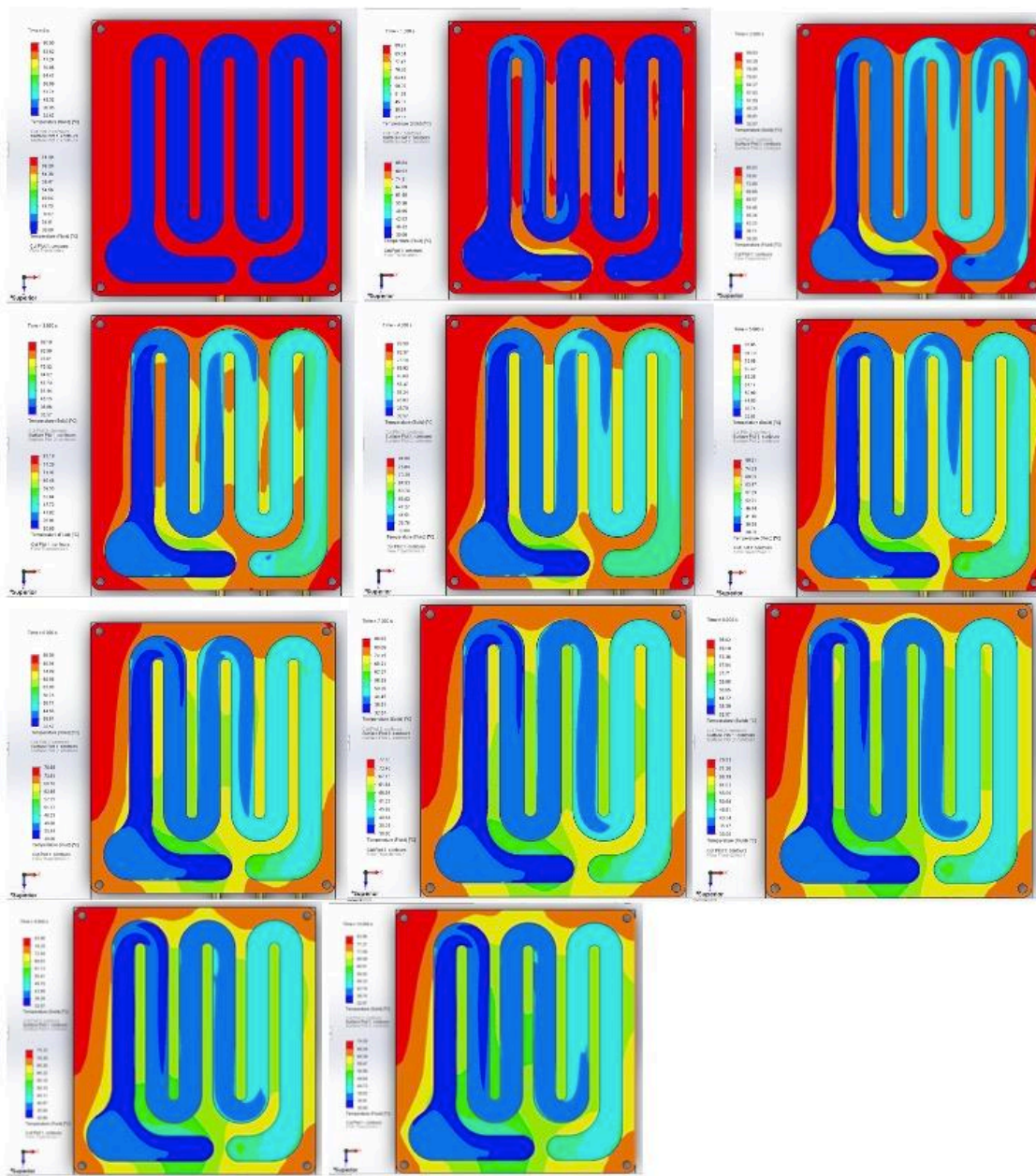


Figura 71. Evolución de la temperatura del intercambiador y el fluido desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 2.

Ahora se observará la evolución de las temperaturas sobre la tapa superior del intercambiador, que es a la tapa a la que se le aplica la temperatura de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ generada por los componentes del controlador, debe recordarse que en este estudio el intercambiador parte de una temperatura inicial igualmente de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, figura 72.

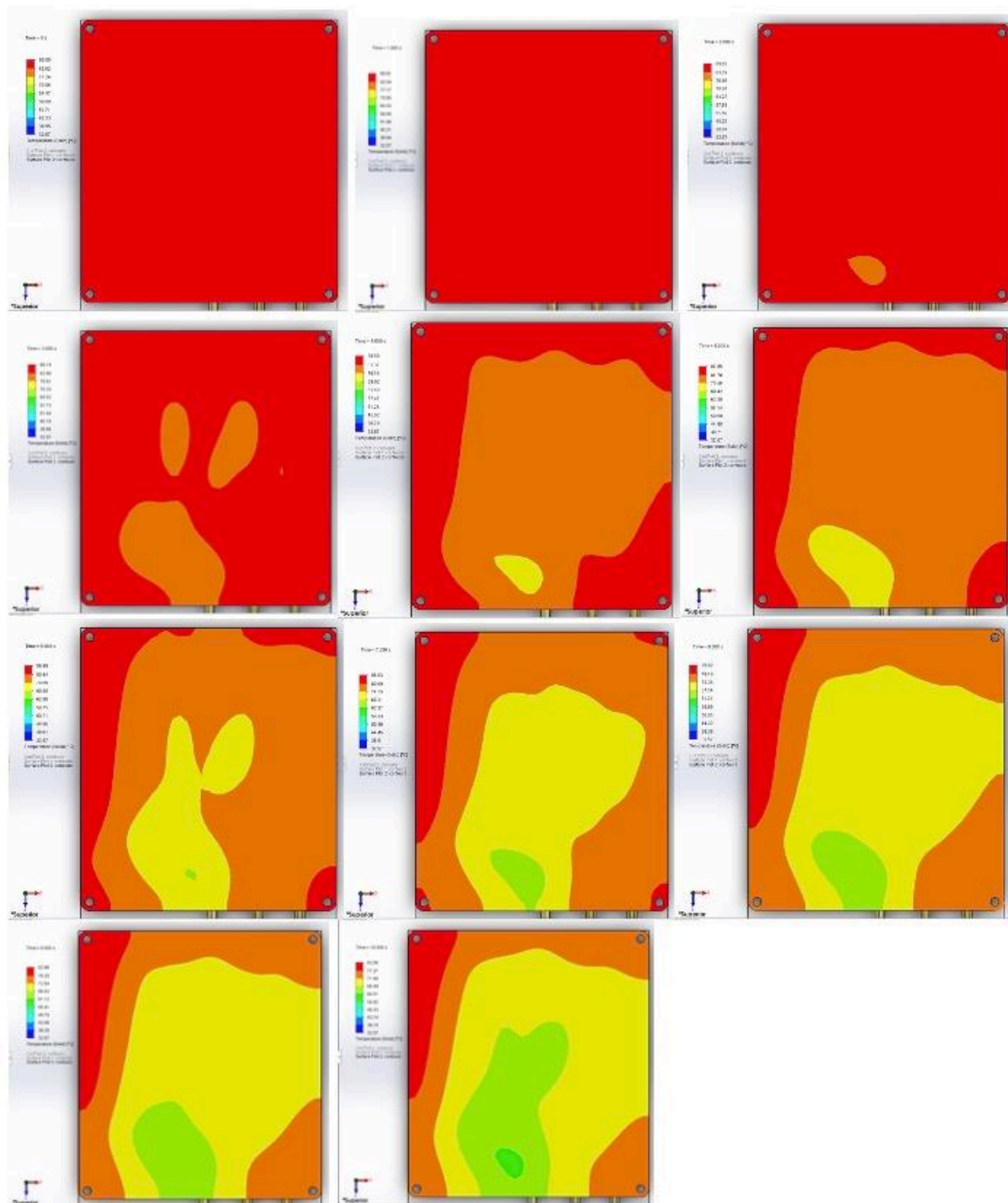


Figura 72. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 2.

Como se puede observar la temperatura de 90°C que se aplicó sobre esta hace que la cara se enfríe más lentamente que en análisis pasado, retardando el enfriamiento del intercambiador, en el segundo 10 llegó a la temperatura de 82.86°C , es interesante comparar estos resultados con los del estudio pasado, en

el cual no se aplicó la temperatura externa de 90°C, así mismo será interesante comparar estos resultados con los de los 2 estudios siguientes.

Temperatura promedio en fluido:

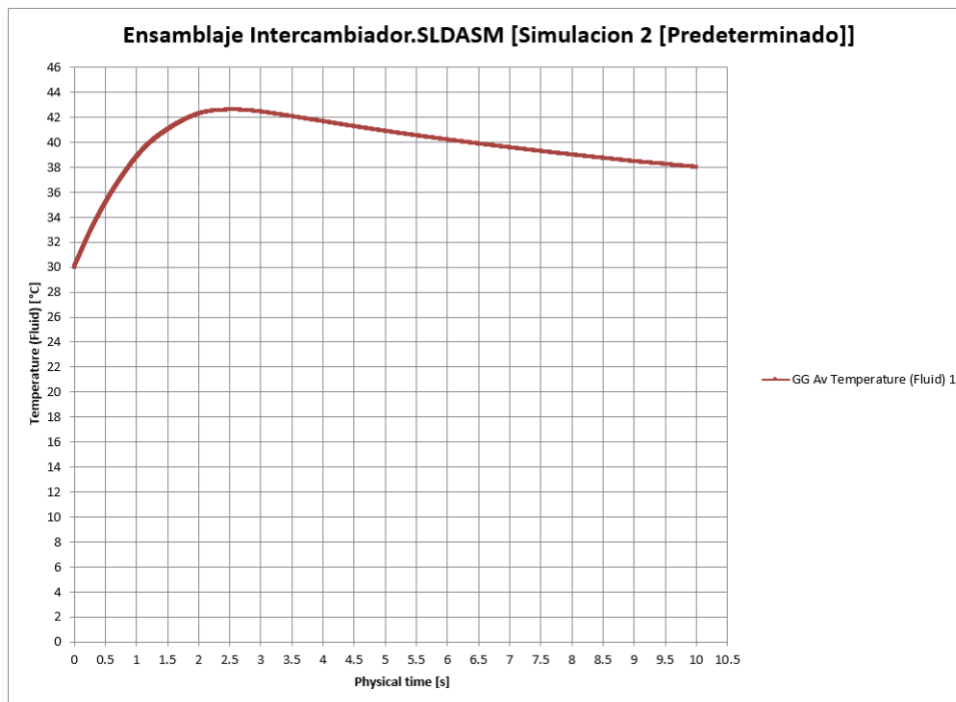


Figura 73. Gráfica de temperatura de fluido vs tiempo transcurrido, en análisis 2.

Para este segundo estudio se puede observar cómo al igual que en el análisis 1 la curva de la temperatura del fluido tiene una rápida subida a partir del inicio del estudio, partiendo de los 30 °C llega hasta los 42.27 °C en el segundo 2, alcanzando un máximo de 42.59 °C en el segundo 3, la curva es muy parecida a la obtenida en el análisis 1, con la diferencia de que se crea un efecto de caída ligeramente menor, alcanzando temperaturas de 40.88 °C en el segundo 5, 39 °C en el segundo 8 y 38 °C en el segundo 10.

Temperatura promedio de sólido:

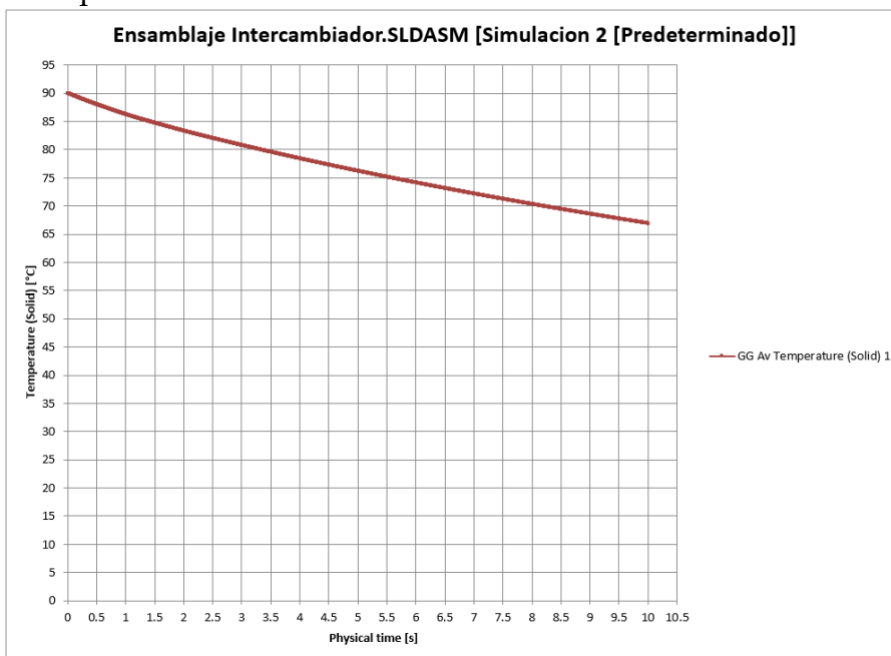


Figura 74. Gráfica de temperatura de sólido vs tiempo transcurrido, en análisis 2.

En esta grafica se puede observar la evolución de la temperatura promedio del sólido a lo largo de los 10 segundos de este análisis 2, partiendo de los 90 °C en el segundo 0 se puede observar cómo va disminuyendo formando una pendiente, comparándola con la pendiente de la simulación anterior se tiene una pendiente menos pronunciada, teniendo temperaturas registradas por ejemplo al segundo 2 de 83.31 °C, en el segundo 5 se registran 76.20 °C y en el segundo 10 se registran 66.91 °C.

4.3 Resultados análisis 3.

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90 °C
Temp. del Ambiente:	30 °C
Temp. de Líquido:	NO CIRCULA LIQUIDO
Temp. Aplicada Sobre Placa:	NO SE APLICA TEMPERATURA SOBRE PLACA

Observando la respuesta transitoria de la temperatura partiendo del $S = 0$ hasta el $S = 10$, en la siguiente secuencia de imágenes obtenidas con la herramienta «Load Time Moment» figura 75.

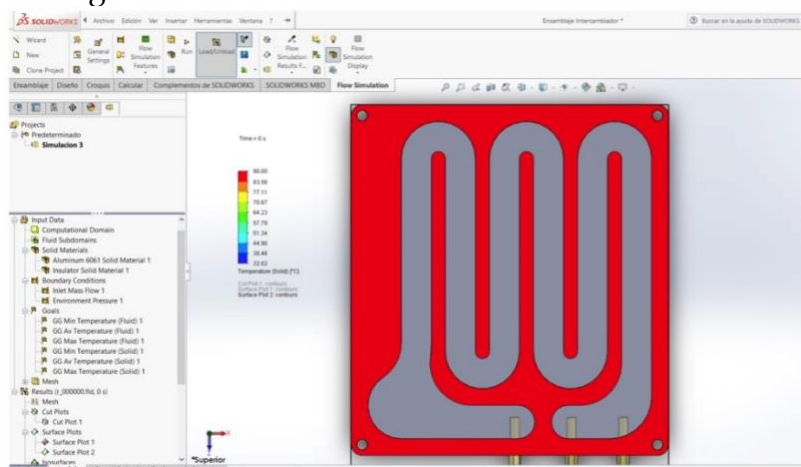


Figura 75. Intercambiador de calor en segundo 0, en análisis 3.

Ambas imágenes muestran que la temperatura del sólido es de 90 °C al inicio del estudio en $T = 0s$.

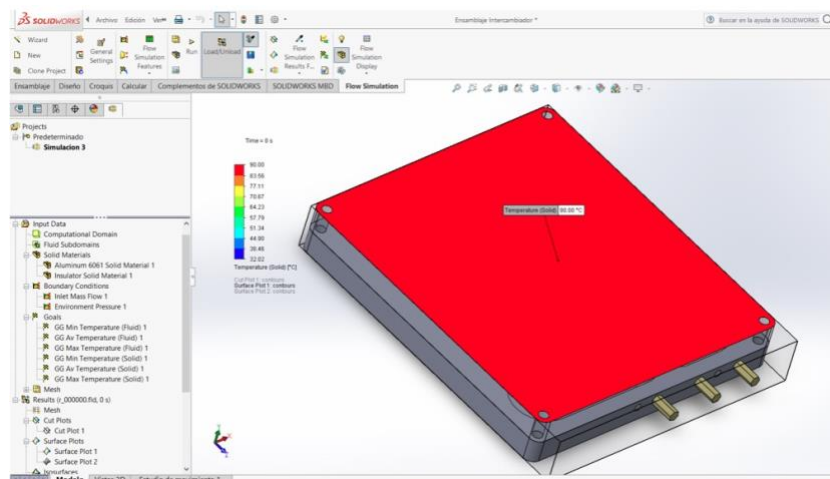


Figura 76. Tapa superior de intercambiador en el segundo 0, en análisis 3.

2.- Secuencia del análisis Transitorio de la Temperatura en el plano medio del intercambiador desde $T = 0s$ hasta $T = 10s$.

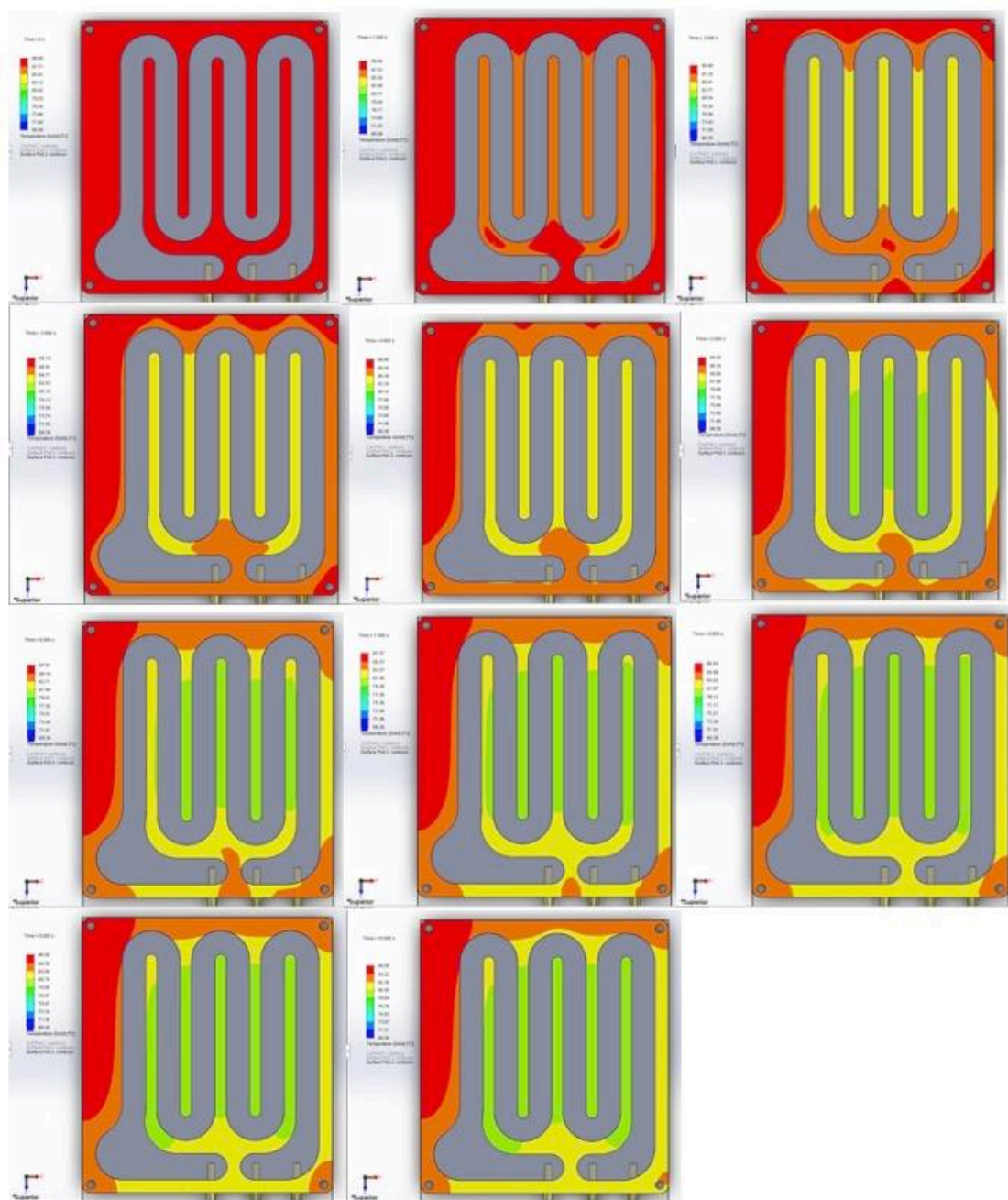


Figura 77. Evolución de la temperatura del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 3.

Los rangos de temperatura registrados van desde los 90.00°C la placa en el $T = 0s$ bajando hasta los 80°C aproximadamente en el $T = 10s$. en algunas zonas centrales de la placa ranurada.

En la siguiente figura se muestran las capturas de sobre la tapa superior del intercambiador en secuencia desde $T = 0s$ hasta $T = 10s$:

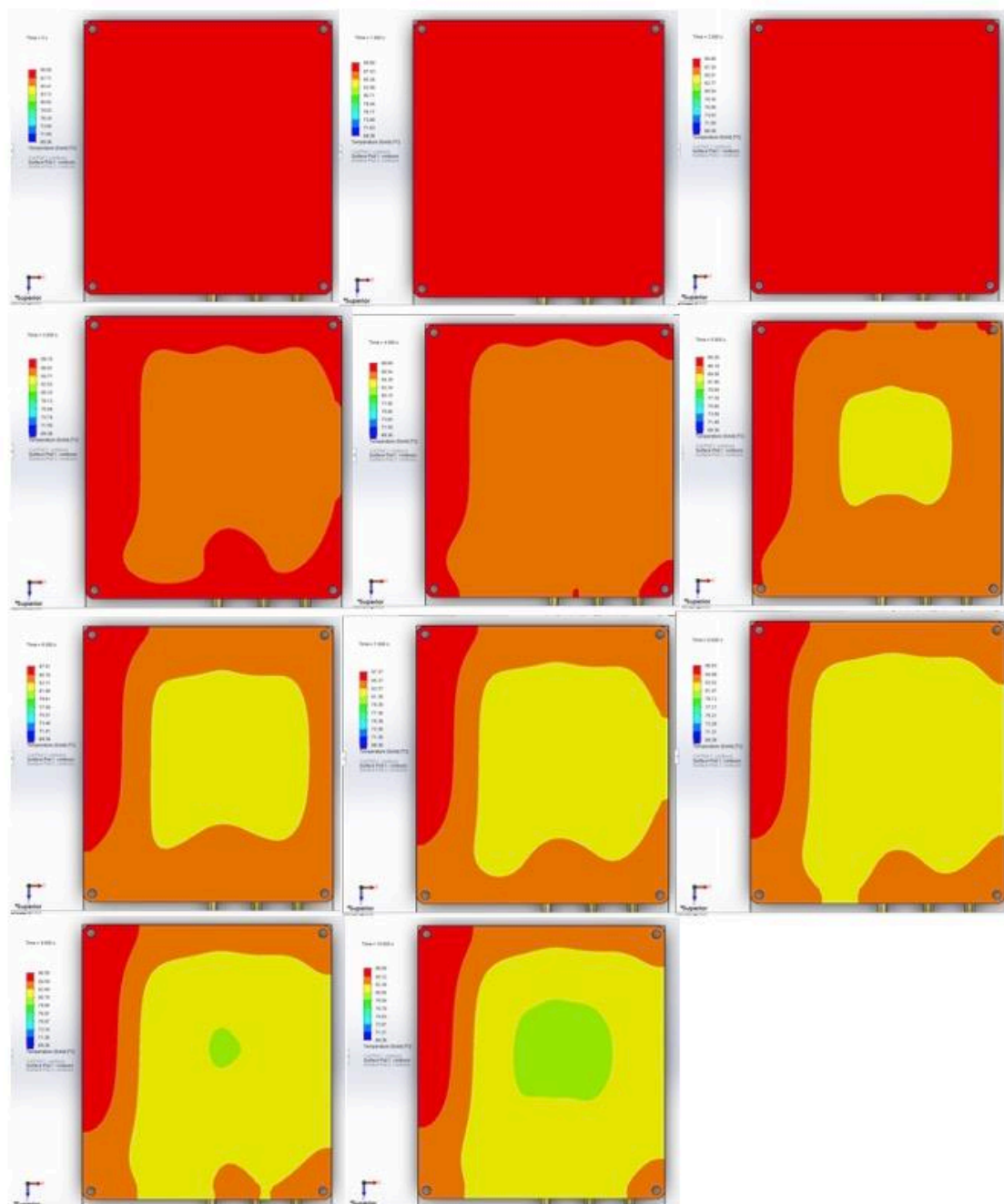


Figura 78. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 3.

Rangos de temperatura registrados son de 89.80°C máxima en $T = 1s$ bajando hasta los 86.08°C máxima en $T = 10s$.

Temperatura promedio en fluido:

En este análisis no existe gráfica de temperatura promedio en fluido ya que como se mencionó anteriormente en el procedimiento del análisis 3 el valor dado al fluido en este estudio es tan pequeño que prácticamente se desprecia, por lo que el resultado a observar en este estudio es la temperatura promedio del sólido:

Temperatura promedio del sólido:

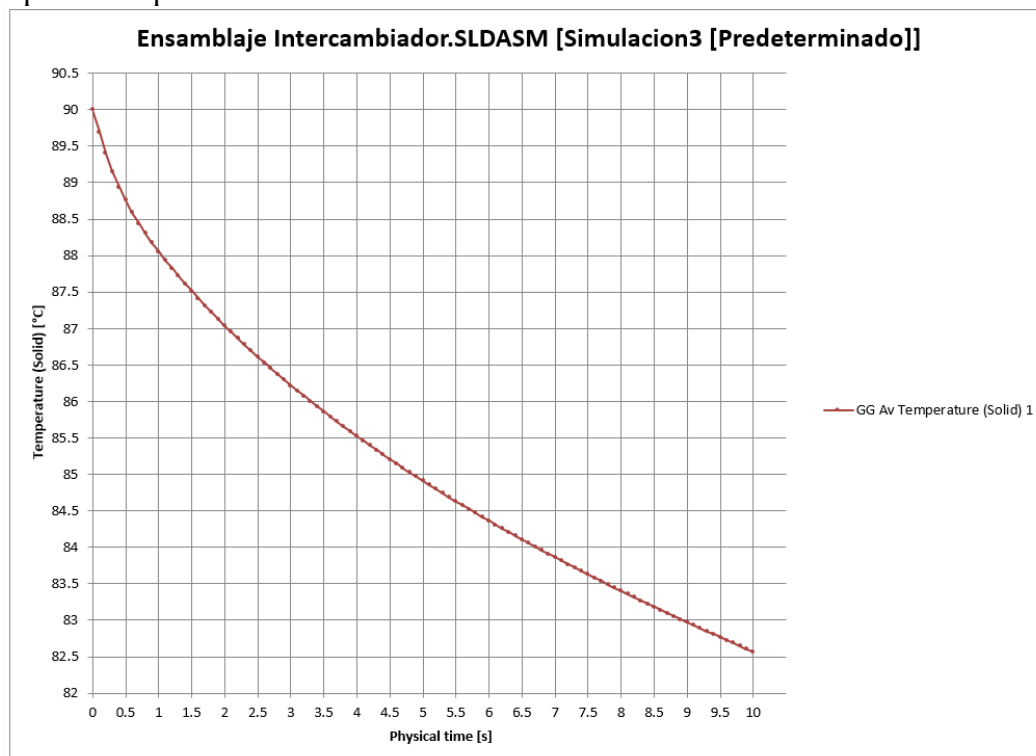


Figura 79. Gráfica de temperatura de sólido vs tiempo transcurrido, en análisis 3.

Recordando que en este análisis no se hace pasar fluido por dentro del intercambiador o es despreciable se observan los valores de temperatura en el sólido, partiendo al igual que en los anteriores de los 90 °C que es la temperatura a la que se activa el sensor de temperatura del sistema de refrigeración se puede observar como la temperatura disminuye formando una curva, obteniendo en el segundo 2 una temperatura de 87 °C, en el segundo 5 de 85 °C, y en el segundo 10 se registró una temperatura de 82.50 °C.

Este análisis se realizó con el fin de compararlo con el análisis 1, ya que en el análisis 1 si se hace circular fluido mientras que en este análisis no, las principales diferencias encontradas son que en el análisis 1 la disminución de la temperatura en el sólido es más rápida, otra diferencia es la temperatura mínima registrada en el segundo 10, en el análisis 1 fue de 66.40 °C mientras que en este estudio esa misma temperatura en el segundo 10 fue de 82.50 °C, 16.10 °C de diferencia, la única condición que cambia es el fluido, resaltando la importancia del calor que despeja el fluido al pasar por el intercambiador.

4.4 Resultados análisis 4.

CONDICIÓN:	VALOR:
Temp. Inicial del Sólido:	90 °C
Temp. del Ambiente:	30 °C
Temp. de Líquido:	NO CIRCULA LIQUIDO
Temp. Aplicada Sobre Placa:	90 °C

Esta es una simulación con fluido estático temperatura inicial 90 °C sobre todos los sólidos y simula condición de apagado de ciclo de enfriamiento, pero con el controlador encendido (aplicando temperatura constante de 90 °C sobre tapa).

Al igual que el estudio anterior se observarán las respuestas transitorias de la temperatura partiendo del S = 0 hasta el S = 10.

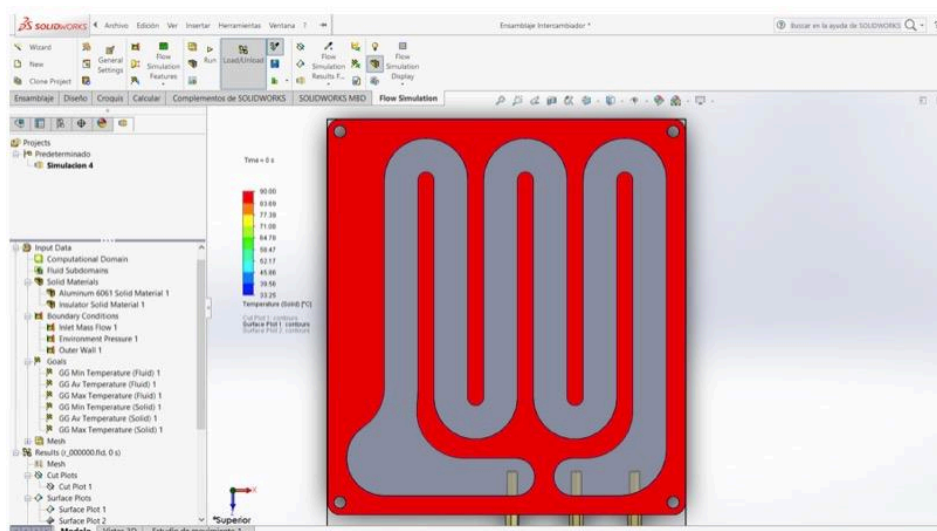


Figura 80. Intercambiador de calor en segundo 0, en análisis 4.

Secuencia de temperaturas en la parte intermedia del intercambiador, tomadas desde el segundo 0 hasta el segundo 10, sin pasar fluido por dentro del dispositivo:

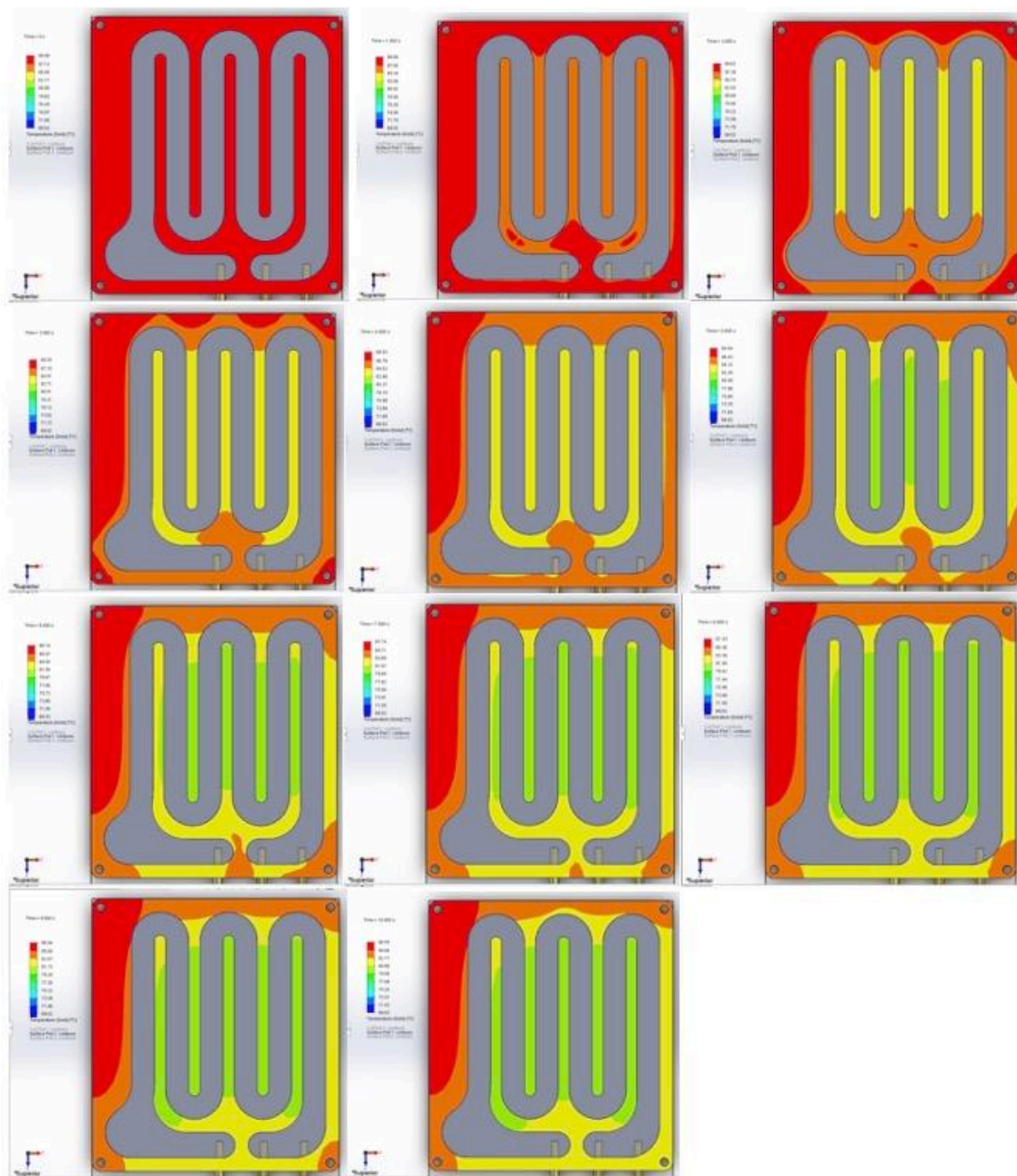


Figura 81. Evolución de la temperatura del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 4.

Capturas de la evolución de las temperaturas sobre la tapa superior del intercambiador, tapa que recibe los 90 °C de calor generados por el controlador,

impresiones desde $T = 0s$ hasta $T=10s$. Recordemos: El fluido no circula por el intercambiador en este estudio, únicamente se enfría por convección natural.

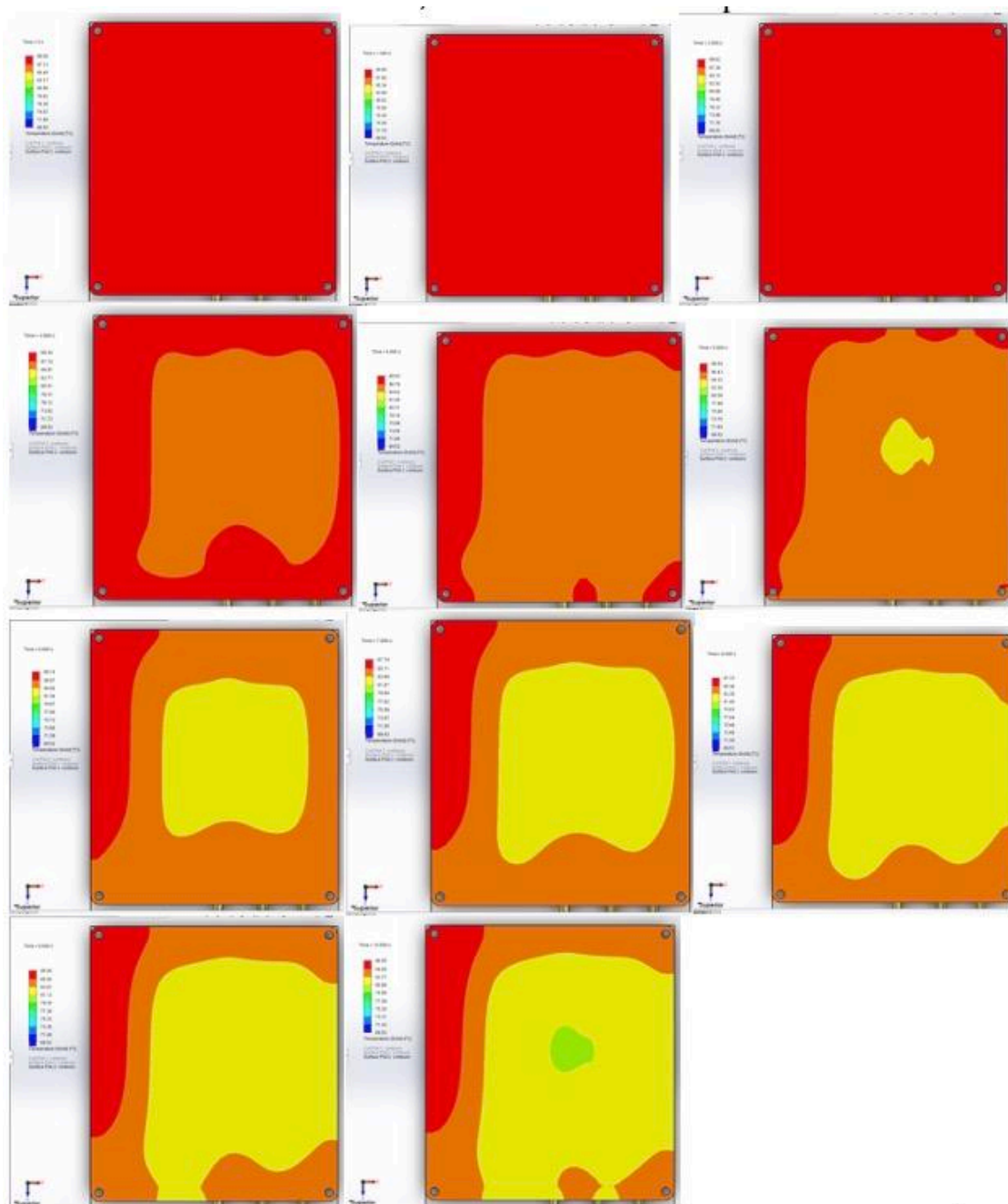


Figura 82. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 4.

Como se puede observar al igual que con las mediciones anteriores, los rangos de temperatura alcanzados en la placa, en este caso, sobre la tapa superior, son mayores que los alcanzados cuando el fluido si circula por dentro del

intercambiador. Se tomaron lecturas de 90°C en el centro de la placa en el $T = 0s$ hasta llegar a los 80.83°C en el $T = 10s$. Con este estudio se puede observar cómo es que el fluido verdaderamente ayuda a disipar calor dentro del intercambiador.

Temperatura promedio en fluido:

Al igual que en el análisis 3 en este análisis no se involucra fluido a través del intercambiador, este análisis se realiza con la intención de hacer un comparativo con el análisis 2, el cual tiene las mismas características, pero haciendo circular fluido por dentro del intercambiador.

Temperatura promedio en sólido:

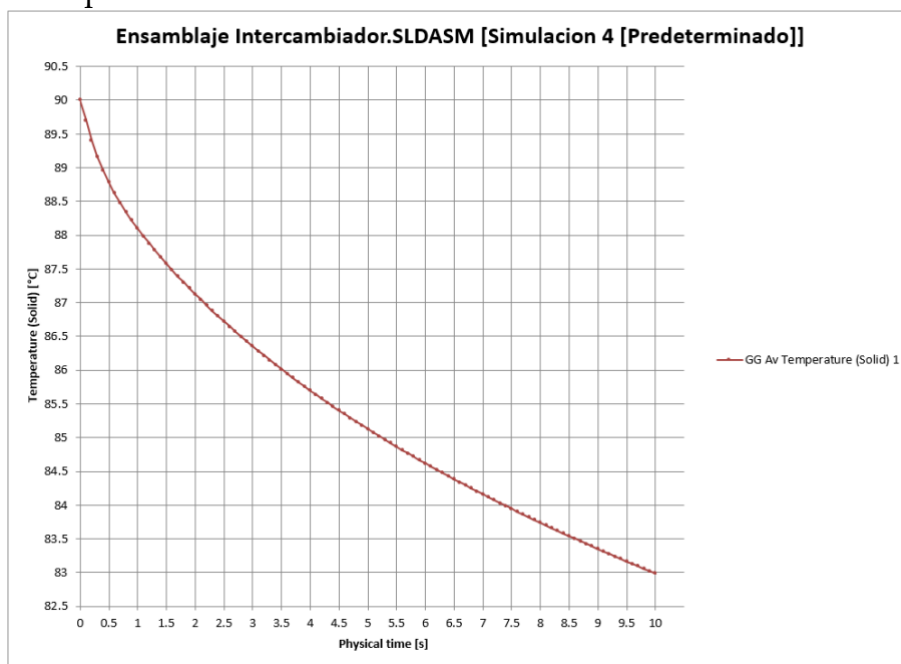


Figura 83. Gráfica de temperatura de sólido vs tiempo transcurrido, en análisis 4.

En este último análisis 4 se pueden observar características como que la curva de descenso en la temperatura es que registra mayor temperatura final, partiendo de los 90 °C en el inicio, se registran 87.12 °C en el segundo 2, 85.10 °C en el segundo 5 y 83 °C en el segundo 10.

La temperatura registrada en el segundo 10 de este análisis, los 83 °C es la temperatura más alta registrada de los 4 análisis, lo que indica que al aplicar una temperatura externa sobre la placa superior y no circular fluido, la placa sigue caliente por más tiempo. Comparado con el análisis 2 el cual en el segundo 10 registra una temperatura de 67 °C se puede corroborar la eficacia del fluido.

CONCLUSIONES

Acerca de este trabajo realizado se pueden obtener diversas conclusiones, ya sea acerca de la parte constructiva del modelo del intercambiador, acerca de la importancia de estos sistemas en los automóviles eléctricos e híbridos, acerca de los métodos de CFD como auxiliares en la creación de sistemas de enfriamiento y acerca de los resultados obtenidos con los distintos análisis realizados sobre el modelo del intercambiador.

Comenzando por la parte constructiva las conclusiones obtenidas son acerca de los métodos utilizados, en este caso el modelado en 3D de la piezas para su posterior maquinado en CNC, como conclusión se queda que el diseño debe ser lo suficientemente bueno para cumplir con sus propiedades térmicas y mecánicas que es para lo que se diseña teóricamente pero a su vez no debe representar una imposibilidad para fabricar, al contrario al momento de diseñar un prototipo o modelo como en este caso se debe pensar por adelantado en el proceso de cómo se fabricará la pieza y las limitantes de las herramientas para poder facilitar la manufactura del mismo. En este caso se pensó en utilizar algunos componentes ya existentes de un sistema de enfriamiento anterior agregando algunas mejoras y proponiendo un diseño de placas de intercambiador el cual se podría fabricar sin representar una gran dificultad para la persona encargada de maquinarlo en el CNC.

Acerca de la importancia de los sistemas de enfriamiento para los EV y los vehículos híbridos se puede concluir que estos vehículos irán aumentando su importancia a lo largo de los años siguientes como lo marcan las tendencias, así mismo el problema del calentamiento en los controladores eléctricos seguirá presente, por lo cual es importante seguir desarrollando este tipo de proyectos dentro de la línea de investigación de los intercambiadores de calor, buscando mejoras ya sea en el diseño del intercambiador, en el sistema de enfriamiento del automóvil en general o ya sea también en el fluido refrigerante utilizado, será interesante ver que nuevas soluciones propondrá la industria o la investigación en los próximos años para seguir solucionando este tipo de problemas de los vehículos híbridos y eléctricos.

Acerca de los métodos de CFD (Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés) y del análisis de elemento finito utilizados en esta tesis, se puede concluir

que son de gran ayuda en el estudio experimental de prototipos ya que se pueden simular distintos escenarios ya sea modificando temperaturas de líquidos o sólidos, modificando temperatura ambiente, condiciones de fluido, condiciones iniciales del estudio, etc. Lo que ayuda a visualizar y comprender mejor cómo es que se comporta el calor y cómo es que cada parámetro afecta de manera diferente cada simulación. En este caso se realizaron cuatro simulaciones variando los parámetros principales que afectan el estudio lo que ayudó a comprender de una manera más clara cómo se comporta el dispositivo intercambiador de calor y que mejoras se le pueden hacer al diseño o bajo qué circunstancias el dispositivo presenta mejores o peores resultados, obviamente siempre buscando una mayor eficiencia del modelo. Existen más programas que utilizan el CFD y el método de elemento finito para realizar este tipo de simulaciones, sería interesante utilizar otro programa para validar los resultados obtenidos en estas simulaciones, así mismo estos programas pueden servir para simulaciones de fluidos diversos como aire, aceite, etc. En diferentes tipos de máquinas y mecanismos.

En cuanto a los resultados obtenidos de los estudios se valida la eficacia del intercambiador propuesto, se realizaron 4 simulaciones, 2 de ellas utilizando condiciones reales en las que trabajará el intercambiador, a una se le aplicó temperatura externa durante el análisis, a la otra sólo temperatura inicial de sólido, a su vez se realizaron dos estudios más de comparación para validar eficacia, el intercambiador logró el cometido de despejar temperatura al hacer circular el fluido que es lo que se buscaba, en la parte experimental se deben validar estos datos u observar si se cumplen las predicciones realizadas por las simulaciones, que diferencias o similitudes existen con los modelos presentados y lo más importante resolver la problemática actual que presenta el vehículo eléctrico para el cual se diseñó este intercambiador, la problemática de que el vehículo se apaga debido a que el controlador eléctrico del automóvil se calienta por arriba de los 90 °C y para protegerse deja de funcionar, si el intercambiador logra que el vehículo siga funcionando sin sufrir este paro el objetivo de este proyecto será cumplido.

Realizar las simulaciones es de gran ayuda para entender el comportamiento del calor y del fluido y de cómo interactúan unos con otros, es un paso importante para proponer nuevos diseños más funcionales y más eficientes, ahorrando tiempo y costos de estudios que de otro modo se tendrían que llevar a cabo realizando prototipos de manera física, construyendo diferentes versiones de diseños y probándolos bajo diferentes parámetros y circunstancias.

REFERENCIAS

1. **Agency, Environmental Protection.** *Environmental Protection Agency*. [En línea] <http://www.epa.gov/>.
2. **Zhou, Yan.** Argonne National Laboratory. [En línea] [Citado el: 1 de Agosto de 2020.] <https://www.anl.gov/es/light-duty-electric-drive-vehicles-monthly-sales-updates>.
3. **Toyota, Akio.** *Toyota Environmental Report 2019*. Tokyo : s.n., 2019.
4. **Incropera, y otros.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. s.l. : ohn Wiley & Sons Inc., 2017.
5. **Kurowski, Paul M.** *Thermal Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018 and Flow Simulation 2018*. s.l. : SDC Publications, 2018. ISBN-13: 978-1-63057-165-8.
6. **Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar.** *Transferencia de Calor y Masa*. s.l. : McGraw-Hill, 2011.
7. **Holman, J. P.** *Transferencia de Calor*. s.l. : McGraw-Hill Education, 2009. ISBN-13 : 978-0073529363.
8. **Augeri, Fernando.** El Módulo Inversor del Toyota Prius. *Cise Electronica*. [En línea] 2010. [Citado el: 1 de Junio de 2020.] <http://www.cise.com/portal/notas-tecnicas/item/235-el-módulo-inversor-del-toyota-prius.html>.
9. *Simulation of the natural convection in an electrical oven.* **Goñi, S. y Salvadori, V.** 11, s.l. : INNOTECH, 2016, págs. 36-41.
10. **Wesseling, P.** *Principles of Computational Fluid Dynamics*. s.l. : Springer, 2001.
11. **Blazek, J.** *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. s.l. : Elsevier Science Ltd, 2001.
12. **Anderson, John D.** *Fundamentals of Aerodynamics*. s.l. : McGraw-Hill Higher Education, 2001.
13. **Sobachkin, A. y Dumnov, G.** *Base numérica de CFD integrada en CAD*. s.l. : SolidWorks, 2014.
14. **SRIRAM, N.** *Design optimization of an interior permanent magnet motor*. Wollongong, Australia : University of Wollongong, 1997.
15. *A Review on Switched Reluctance Machines for Electric Vehicles.* **N. Zabihi, R. Gouws.** Potchefstroom : IEEE, 2016. School of Electrical, Electronic, and Computer Engineering. págs. 799-804.
16. **Lozano, Héctor A.** *Tesis: Diseño y fabricación de variador de frecuencia para aplicación en autos híbridos y eléctricos*. San Nicolas de los Garza : UANL-FIME, 2020.
17. *HYBRID HORSEPOWER: HYBRID/EV RACING TECHNOLOGY.* **Kelly, John D.** 2013, MotorAge, págs. 1-6.

18. **Perez, J. M.** Wikimedia Commons. *Hybrid Synergy Drive, Toyota Prius*. [En línea] 2005. [Citado el: 15 de Abril de 2020.]
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ToyotaOpenHSD.jpg>.
19. **Qi Huang, Jian Li and Yong Chen** . *Control of Electric Vehicle*. P.R.China : University of Electronic Science and Technology of China , 2010.
20. **Cai Chi-lan*, Wang Xiao-gang, Bai Yue-wei, Xia Yan-chun, Liu Kai**. *Key Technologies of EV Motor Drive System Design*. Shanghai : Shanghai Second Polytechnic University, 2011.
21. **Syed Usama Hassan, Hafiz Bilal Akram**. *Speed and Frequency Control of AC Induction*. Islamabad, Pakistan : Institute of Space Technology, 2015.
22. **Al-Sharif, Lutfi**. *Variable Speed Drives in Lift Systems*. London : United Kingdom, 2001.
23. **Martínez, Javier**. *AUTOS HIBRIDOS*. s.l. : Universidad Catolica.
24. **Rassõlkin, Anton**. *A Test Bench to Study Propulsion Drives*. Tallinn : Tallinn University of Technology, 2013.
25. **SRIRAM, N**. *Desing optimization of an interior permanet magnet motor*. Wollongong, Australia : University of Wollongong, 1997.
26. **Un-Noor, Fuad**. *A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV)*. Khulna : Sergio Saponara , 2017.
27. **Ruíz, Melissa García**. *PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE VEHICULOS ELECTRICOS*. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.
28. *Simulation Analysis of SPWM Variable Frequency Speed Based on Simulink*. **DI, Min-Yan**. s.l. : IFSA Publishing, S. L., 2014, Sensors & Transducers, págs. 15-21.
29. *Electric Vehicles and Energy Storage - a case study on Ireland*. **Foley, Aoife M, Leahy, Paul y Mckeogh, Eamon**. s.l. : Fifth IEEE International Vehicle Power and Propulsion Conference, 2016.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Tesla 2020 Model X Long Range con autonomía de 564 km, de acuerdo con la norma EPA (Environmental Protection Agency) (Agency, s.f.).	5
Figura 2. Toyota Prius Prime el híbrido enchufable con un rendimiento de 22.96 km/l, fuente: EPA (Environmental Protection Agency) (Agency, s.f.).	6
Figura 3. Ventas acumuladas en USA de Eléctricos e Híbridos hasta junio de 2020 (Zhou, s.f.).	8
Figura 4. Ventas mensuales en USA de autos enchufables eléctricos e híbridos desde diciembre de 2010 hasta junio de 2019 (Zhou, s.f.).	8
Figura 5. Esquema de transferencia de calor dentro de un cuerpo sólido (Kurowski, 2018).	12
Figura 6. Conductividad térmica en diferentes materiales (Kurowski, 2018).	12
Figura 7. Convección natural y convección forzada (Kurowski, 2018).	13
Figura 8. Orden de magnitud del coeficiente de película en diferentes procesos (Kurowski, 2018).	14
Figura 9. Diferentes casos de transferencia de calor por radiación (Kurowski, 2018).	15
Figura 10. Diseños de disipadores de calor con aletas (Yunus A. Çengel, 2011).	16
Figura 11. En la fotografía se pueden observar estos conductos para enfriamiento del controlador de un Toyota Prius (Augeri, 2010).	18
Figura 12. Distintos tipos de análisis disponibles con SolidWorks Flow Simulation.	22
Figura 13. Mallado de volúmenes finitos, más comúnmente referido como cuadrícula (Kurowski, 2018).	23
Figura 14. Vehículo eléctrico de hardware libre TABBY EVO	24
Figura 15. Motor y sistema de tracción de Audio e-tron.	25
Figura 16. Motor eléctrico del Toyota Prius, se pueden ver cuatro cables que son las 3 fases y el neutro de una conexión en estrella.	26
Figura 17. La imagen muestra control de la onda senoidal usando un SPWM (Lozano, 2020).	27
Figura 18. Circuito equivalente, conexión en "estrella" sin neutro y "delta".	27
Figura 19. Ondas de voltaje requeridas para activar cualquier motor de un EV/HEV (Lozano, 2020).	28
Figura 20. Fotografía de controlador o inversor de Toyota Prius (Perez, 2005).	28
Figura 21. Controlador AC-L1.	30
Figura 22. Placa de aluminio 6061-T6 utilizada en este proyecto.	30
Figura 23. Izq. Máquina de CNC Eumach V-16, Der. Programa de CNC BobCAD-CAM.	31

Figura 24. Izq. Fotografía del RTD utilizado en medición de temperatura, Der. Medidas del RTD.....	32
Figura 25. Bomba hidráulica Bayite 1.2 GPM y manguera Variflex 300psi.....	33
Figura 26. Tanque de almacenamiento de refrigerante.	33
Figura 27. Conjunto radiador ventilador.....	34
Figura 28. Convertidor DC/DC Chennic JCDI41.....	34
Figura 29. Vehículo eléctrico de hardware libre TABBY EVO utilizado en este proyecto para diseñar el sistema de enfriamiento líquido.....	35
Figura 30. Medidas del controlador AC-L1, utilizadas para la fabricación del intercambiador de calor.	37
Figura 31. Croquis de la base y extrusión de 5/8".....	37
Figura 32. Croquis utilizado para producir el canal del intercambiador de calor diseñado.....	38
Figura 33. Croquis utilizado para colocación de sensores de temperatura.	39
Figura 34. Diseño generado del intercambiador de calor en formato de solido paramétrico en 3D.....	40
Figura 35. Diseño generado del intercambiador del proyecto en software CAM (Manufactura asistida por computadora).....	41
Figura 36. Proceso de maquinado de la placa del intercambiador.	42
Figura 37. Prototipo de intercambiador fabricado.....	42
Figura 38. Ensamble de intercambiador utilizado para los análisis.	49
Figura 39. Definición de material para cada componente, en análisis 1.	50
Figura 40. Definición de condiciones de frontera de estudio 1, gasto másico.....	50
Figura 41. Mallado del modelo total del intercambiador, en análisis 1.	51
Figura 42. Metas globales «Global Goals», parámetros a calcular, en análisis 1.	51
Figura 43. Uso de herramienta «Cut Plots» para observar distribución de temperaturas sobre el fluido, en análisis 1.	52
Figura 44. Uso de herramienta « Surface Plots » para observar distribución de temperaturas sobre las superficies de los sólidos, en análisis 1.....	53
Figura 45. Uso de herramienta « Probe » para observar valores puntuales de temperaturas, en análisis 1.....	54
Figura 46. Distribución de temperaturas y valores puntuales sobre base de controlador, en análisis 1.....	54
Figura 47. Trayectorias de flujo con escala de colores que representa distribución de temperatura en fluido, usando « Flow trajectories », en análisis 1.....	55
Figura 48. Herramienta «Outer Wall» agrega temperatura de 90 °C.	57
Figura 49. Temperaturas del fluido dentro del intercambiador en el segundo 10, en análisis 2.	57
Figura 50. Temperaturas del solido a la mitad del intercambiador en el segundo 10, en análisis 2.	58

Figura 51. Temperaturas del solido a la mitad del intercambiador medida con probetas, segundo 10, en análisis 2.....	59
Figura 52. Temperaturas del solido sobre la superficie superior en el segundo 10 medida con probetas, en análisis 2.	59
Figura 53. Temperaturas del solido medida por encima del ranurado en el segundo 10, en análisis 2.	60
Figura 54. Trayectoria del fluido por dentro del intercambiador, en análisis 2...60	
Figura 55. Parámetros generales del análisis 3.	62
Figura 56. Modificación de valor de flujo de entrada en análisis 3.	62
Figura 57. Temperaturas registradas a mitad del intercambiador en el Segundo 10, en análisis 3.	63
Figura 58. Temperaturas registradas sobre corte de placa superior justo por encima del ranurado segundo 10, en análisis 3.	64
Figura 59. Tiempo de resolución del análisis 4 (1.13 minutos).....	65
Figura 60. Temperaturas registradas en intercambiador en el segundo 10, en análisis 4.	66
Figura 61. Temperaturas registradas sobre cara superior de intercambiador al segundo 10, en análisis 4.	67
Figura 62. Intercambiador con temperatura de fluido y de solido en el Segundo 10, en análisis 1.	68
Figura 63. Herramienta «Load Time Moment» para seleccionar que segundo se desea observar.	69
Figura 64. Vista de intercambiador en el segundo 0, en análisis 1.	70
Figura 65. Evolución de la temperatura del intercambiador y el fluido desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 1.	71
Figura 66. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 1.....	72
Figura 67. Gráfica de temperatura de fluido vs tiempo transcurrido, en análisis 1.....	73
Figura 68. Gráfica de temperatura de solido vs tiempo transcurrido, en análisis 1.....	74
Figura 69. Temperaturas de sólido y fluido en el segundo 0, en análisis 2.	75
Figura 70. Temperatura de superficie superior de intercambiador en el segundo 0, en análisis 2.	76
Figura 71. Evolución de la temperatura del intercambiador y el fluido desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 2.	77
Figura 72. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 2.	78
Figura 73. Gráfica de temperatura de fluido vs tiempo transcurrido, en análisis 2.....	79

Figura 74. Gráfica de temperatura de solido vs tiempo transcurrido, en análisis 2.....	80
Figura 75. Intercambiador de calor en segundo 0, en análisis 3.....	81
Figura 76. Tapa superior de intercambiador en el segundo 0, en análisis 3.....	81
Figura 77. Evolución de la temperatura del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 3.....	82
Figura 78. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 3.....	83
Figura 79. Gráfica de temperatura de solido vs tiempo transcurrido, en análisis 3.....	84
Figura 80. Intercambiador de calor en segundo 0, en análisis 4.....	85
Figura 81. Evolución de la temperatura del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 4.....	86
Figura 82. Evolución de la temperatura en la cara superior del intercambiador desde el segundo 0 hasta el segundo 10, en análisis 4.....	87
Figura 83. Gráfica de temperatura de solido vs tiempo transcurrido, en análisis 4.....	88
Figura 84. Ensamble de intercambiador utilizado para análisis.....	97
Figura 85. Herramienta «Wizard» de Flow Simulation.....	98
Figura 86. Ventana para nombrar nuevo proyecto.....	98
Figura 87. Selección de sistema de unidades internacional SI para estudio.....	99
Figura 88. Selección de tipo de análisis y del tiempo del análisis.....	99
Figura 89. Fluido a usar en simulación «Water».....	100
Figura 90. Material a utilizar en el estudio: Aluminio 6061.....	100
Figura 91. Se inserta el coeficiente de transferencia de calor para el estudio.....	101
Figura 92. Ventana de parámetros iniciales del estudio.....	101
Figura 93. El programa reconoce el volumen del fluido.....	102
Figura 94. Definición de material para cada componente.....	102
Figura 95. Se asigna el material «Insulator» a cada tapón.....	103
Figura 96. Flujo másico de entrada al intercambiador 0.08 kg/s a 30 °C.....	103
Figura 97. Presión atmosférica sobre la cara del tapón en la salida del intercambiador.....	104
Figura 98. Mallado del modelo total del intercambiador.....	104
Figura 99. Se definen las metas globales del estudio (Temp. mínima, media y máxima en sólido y en fluido).....	105
Figura 100. Ventana de inicio para resolución de análisis.....	105
Figura 101. Parámetros de resolución del estudio.....	106
Figura 102. Tiempo total de análisis transcurrido 13 horas 26 minutos, en análisis 1.....	106

Apéndice A. Configuración utilizando el asistente del Software Flow Simulation.

1.- Comenzamos por abrir el ensamble que se realizó del intercambiador de calor, como se puede observar este ensamble está formado por los componentes que se usarán para el modelo real, la placa superior la cual está en contacto con el controlador, la placa inferior la cual se maquinó con la trayectoria que seguirá el fluido, los sensores que llevará el intercambiador para registrar temperaturas de entrada y de salida del líquido, adicionalmente para poder realizar este estudio utilizando Flow Simulation se deben colocar en la entrada y salida de las mangueras unos tapones, esto para delimitar en el software el volumen en donde se encuentra el líquido, así que se pueden apreciar en la entrada y salida del intercambiador estos dos pequeños tapones que no afectan en nada al estudio, al contrario lo permiten.

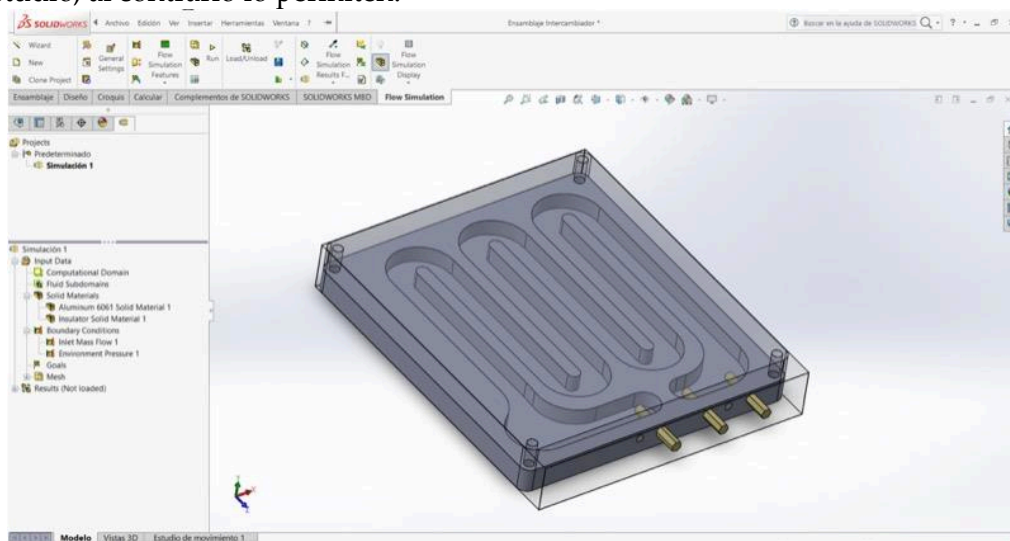


Figura 84. Ensamble de intercambiador utilizado para análisis.

2.-El siguiente paso es ir a la pestaña de Flow Simulation (Teniendo en cuenta que se debe instalar primero el módulo de Flow Simulation en SolidWorks), e Iniciar un nuevo estudio, para esto se utilizará el asistente o «Wizard»:



Figura 85. Herramienta «Wizard» de Flow Simulation.

3.-Una vez iniciado el asistente se procede a dar nombre al nuevo estudio, en este caso el estudio se llamará “Análisis 1”.

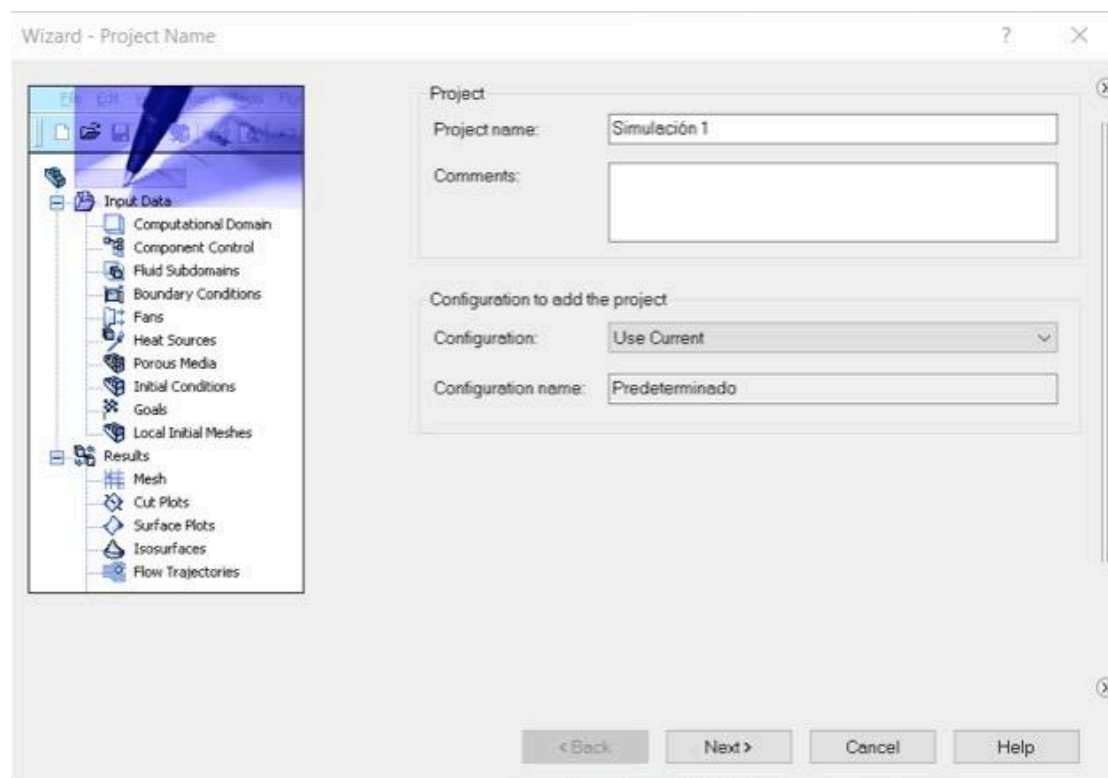


Figura 86. Ventana para nombrar nuevo proyecto.

4.-El siguiente paso es seleccionar las unidades en las que se realizará el estudio, se utilizará el SI para este estudio, únicamente se cambiarán las unidades de temperatura de Kelvin a °C.

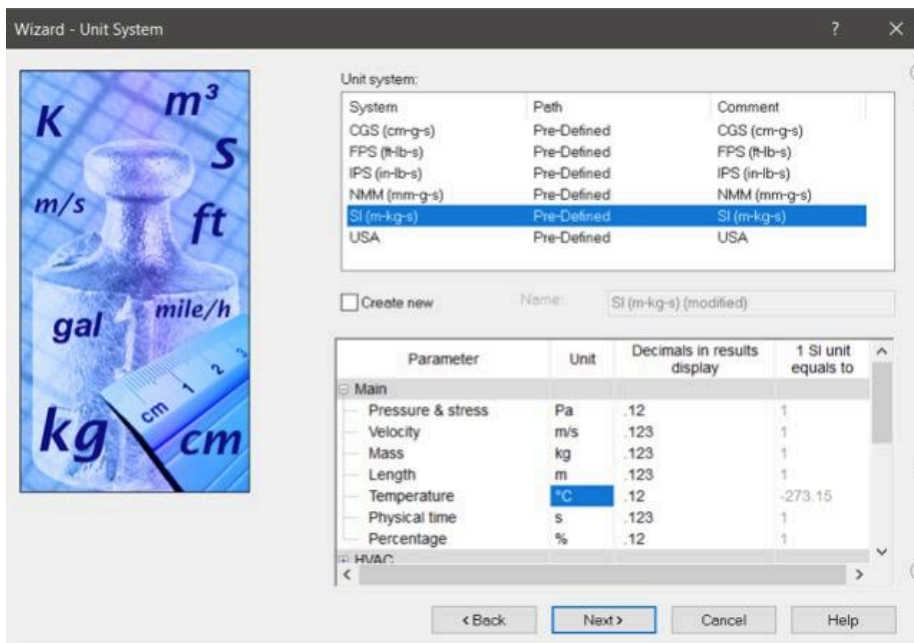


Figura 87. Selección de sistema de unidades internacional SI para estudio.

5.- El siguiente paso es definir el tipo de análisis, en esta ventana se selecciona la opción de «heat conduction in solids» ya que queremos observar cómo se transfiere el calor a lo largo de la placa y de la placa maquinada, así mismo se selecciona la casilla de «time-dependent» ya que este será un estudio en estado transitorio y se involucra el tiempo, el tiempo de análisis será de 10 segundos con incrementos de 0.1 segundos.

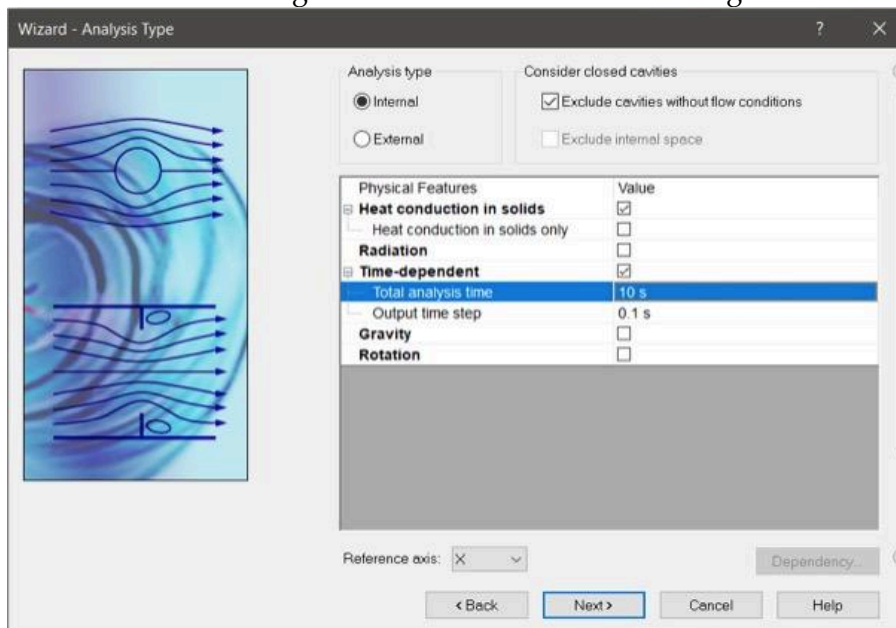


Figura 88. Selección de tipo de análisis y del tiempo del análisis.

6.-Se selecciona el fluido a utilizar para el estudio, en este caso se hará la simulación con Agua. (WATER).

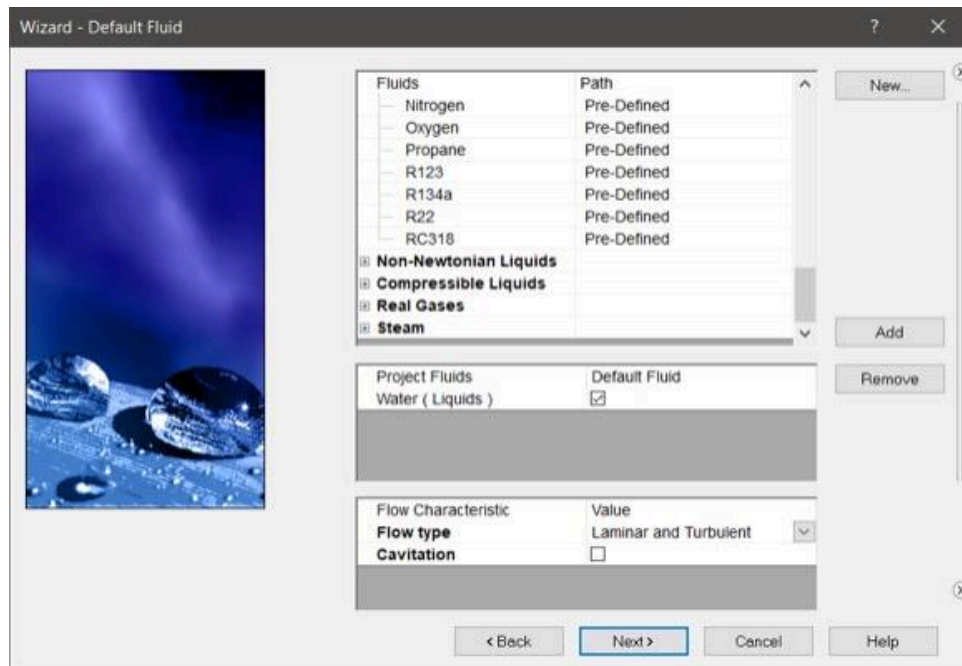


Figura 89. Fluido a usar en simulación «Water».

7.-Se selecciona el material principal del Sólido para el estudio, en este caso el material de las placas que como se mencionó anteriormente es la aleación de Aluminio 6061.

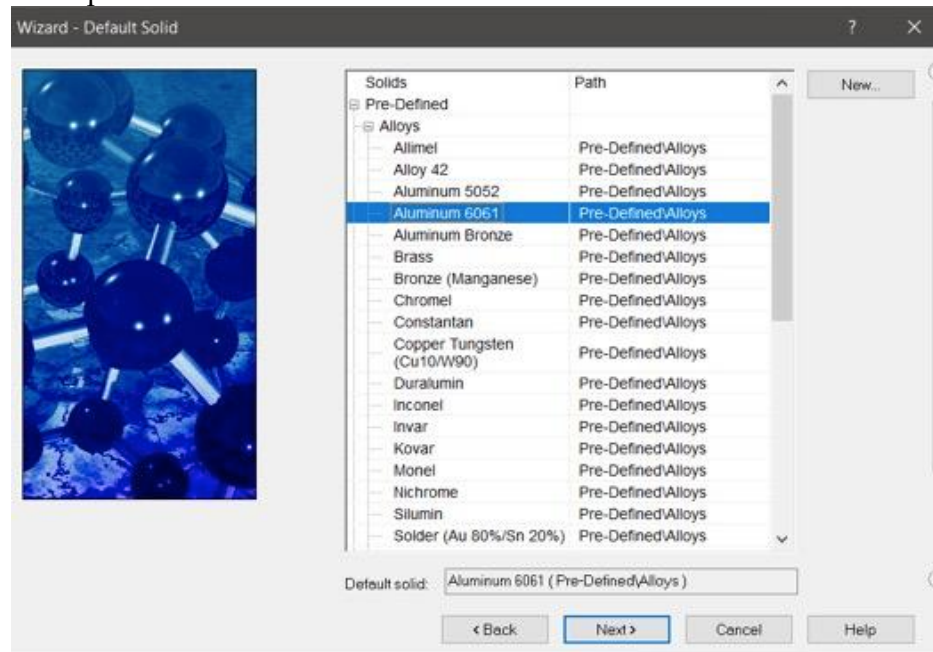


Figura 90. Material a utilizar en el estudio: Aluminio 6061.

8.-Para el paso siguiente colocamos las condiciones de muro exterior al ambiente, dando clic en la opción de «heat transfer coefficient», en la casilla se coloca el valor de coeficiente de transferencia de calor sugerido de $50 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (5). Para la temperatura del fluido externo se usará la de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ que es la temperatura ambiente, la temperatura del aire.

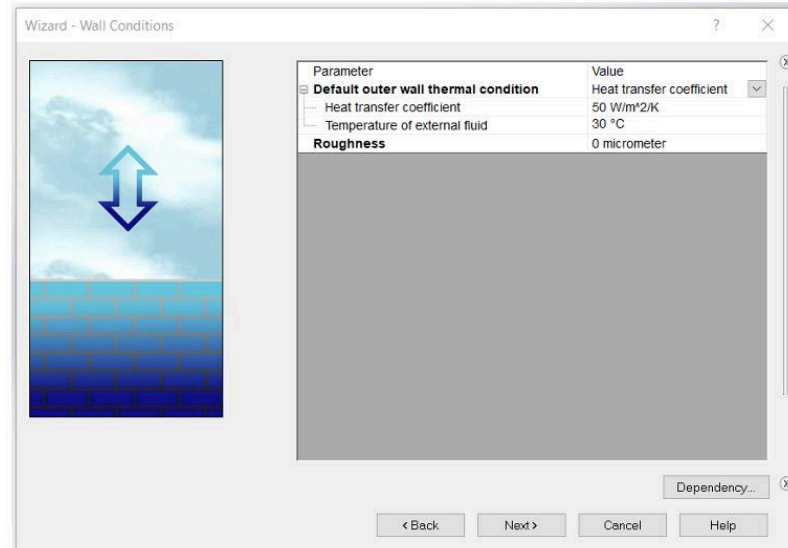


Figura 91. Se inserta el coeficiente de transferencia de calor para el estudio.

9.- Para las condiciones iniciales se deja una temperatura inicial del estudio ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. En la casilla de parámetros del sólido se deja una temperatura inicial del sólido de $90 \text{ }^\circ\text{C}$, ya que es la temperatura a la que llega a calentarse el controlador a su máxima capacidad antes de activarse el sistema de enfriamiento líquido. Con esto observaremos cuánta temperatura logra bajar el fluido en la placa de aluminio. Se da clic en «Finish».

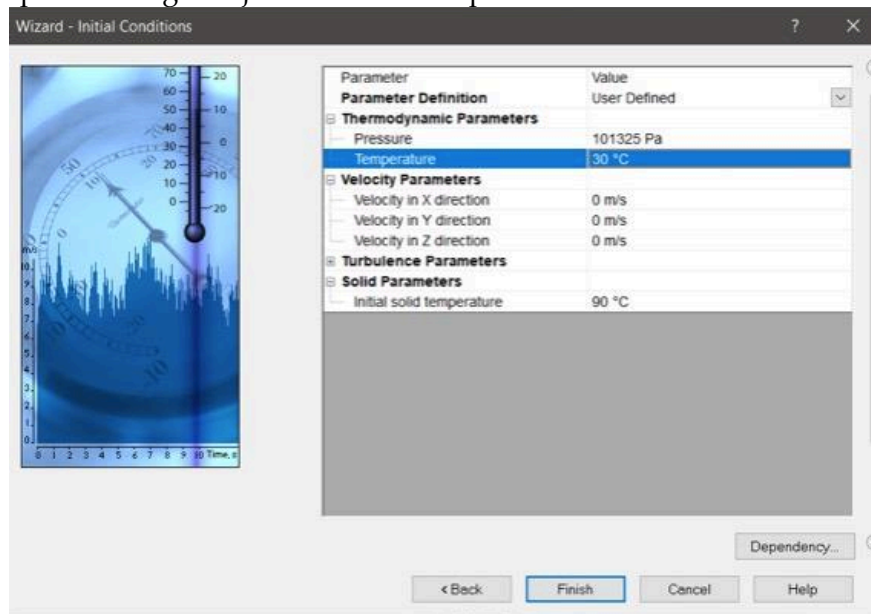


Figura 92. Ventana de parámetros iniciales del estudio.

10.- En este estudio no es necesario añadir la opción de «Fluid Subdomain» ya que el único líquido a utilizar en el estudio es el agua, así mismo es un estudio interno y ya se especificó anteriormente que el aire en el ambiente se encuentra a 30 °C.

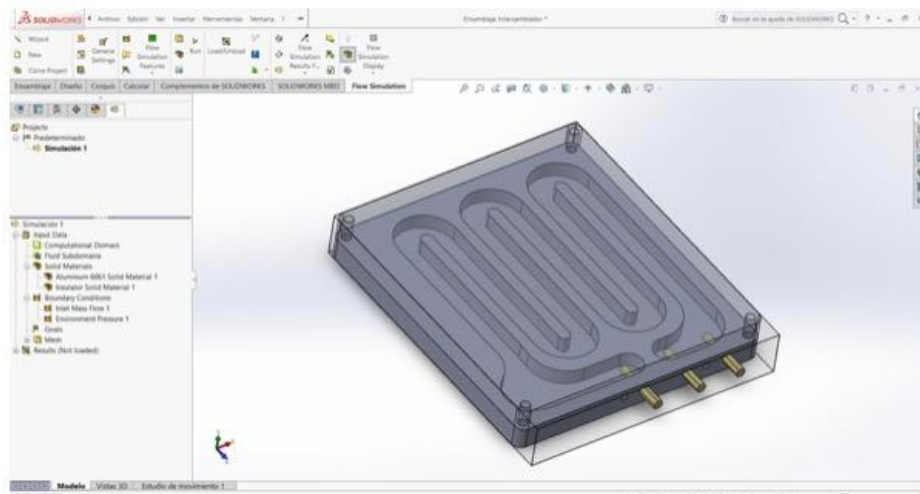


Figura 93. El programa reconoce el volumen del fluido.

11.-Terminado el Asistente de Estudio, lo primero que se hará es definir por separado el material de cada componente, para esto se da clic derecho sobre la opción «Solid Materials» en la barra de opciones del estudio que aparece en la parte inferior izquierda de la pantalla, seguido en el árbol de ensamblaje se seleccionan las partes de dissipador y placa y a continuación se les asigna el material Aluminio 6061 el cual se encuentra dentro de «Alloys», se da clic en aceptar.

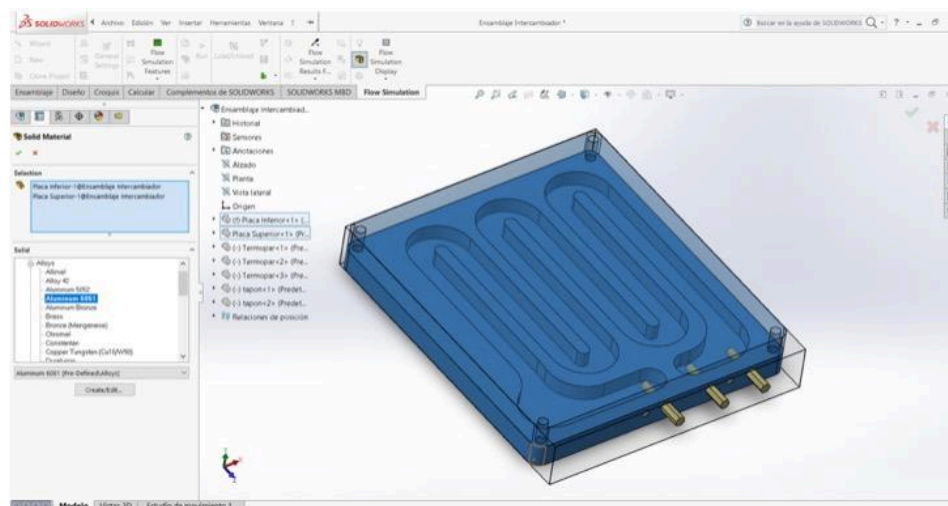


Figura 94. Definición de material para cada componente.

12.- A los tapones se les agrega el material «Insulator» para que no interfieran con los valores del estudio, este material se encuentra en la opción «Glasses and Minerals».

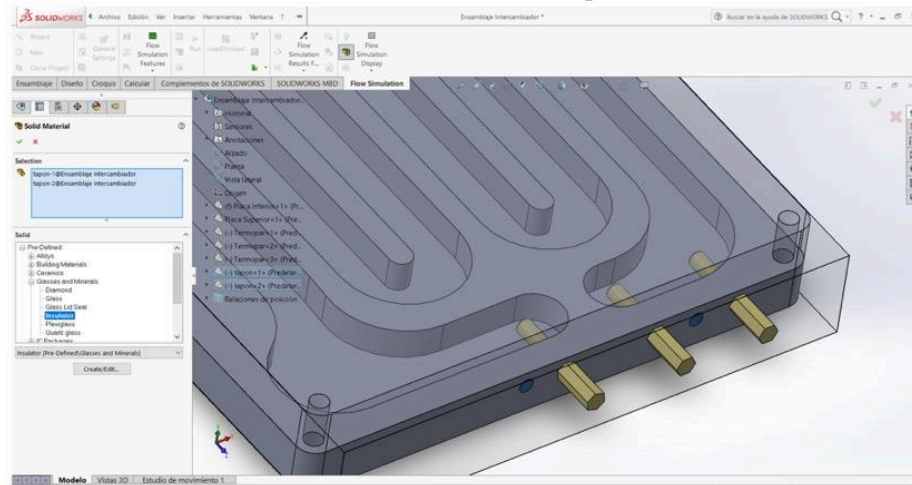


Figura 95. Se asigna el material «Insulator» a cada tapón.

13.- Paso siguiente es insertar la primera condición de fluido para esto se da clic derecho en «boundary condition e insert boundary condition». La condición que se inserta es la del flujo de líquido entrante en el intercambiador, para esto se debe seleccionar la cara interna del tapón que es en donde se supone está la manguera de entrada al intercambiador, una vez seleccionada la cara se le da un valor de flujo másico de 0.08 kg/s ya que esta es la capacidad de flujo que nos entrega la bomba que se está utilizando en este sistema. Así mismo se le da al flujo entrante una temperatura de 30 °C la cual es la temperatura ambiente de este estudio.

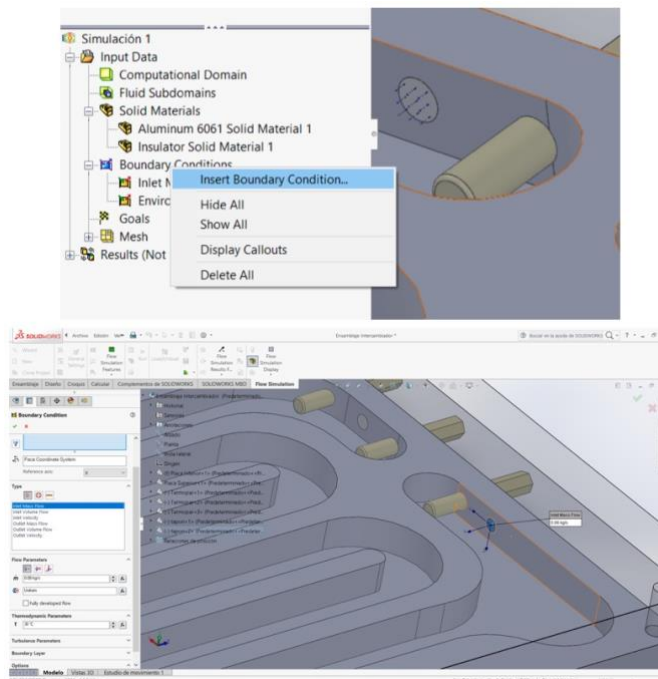


Figura 96. Flujo másico de entrada al intercambiador 0.08 kg/s a 30 °C.

14.- La siguiente condición que se agrega es a la salida del intercambiador, sobre la cara interna del tapón que está en la salida del fluido se coloca una condición de presión atmosférica tal como se puede ver en la imagen. Se da clic en aceptar.

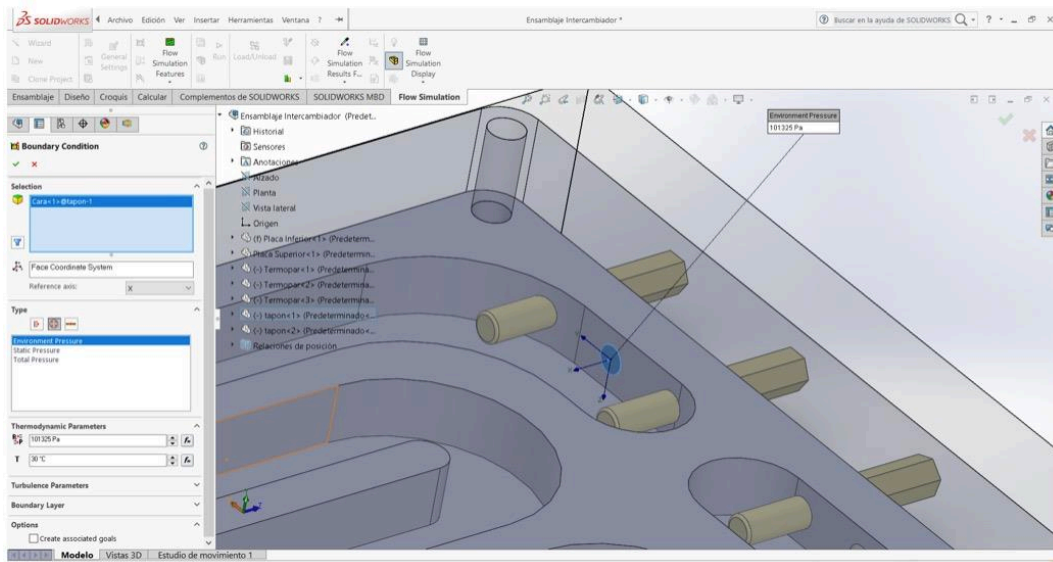


Figura 97. Presión atmosférica sobre la cara del tapón en la salida del intercambiador.

15.- El siguiente paso es realizar el mallado del modelo, el cual permite ver con detalle cómo es que el calor se transmite a través de las superficies y a través del cuerpo sólido del intercambiador.

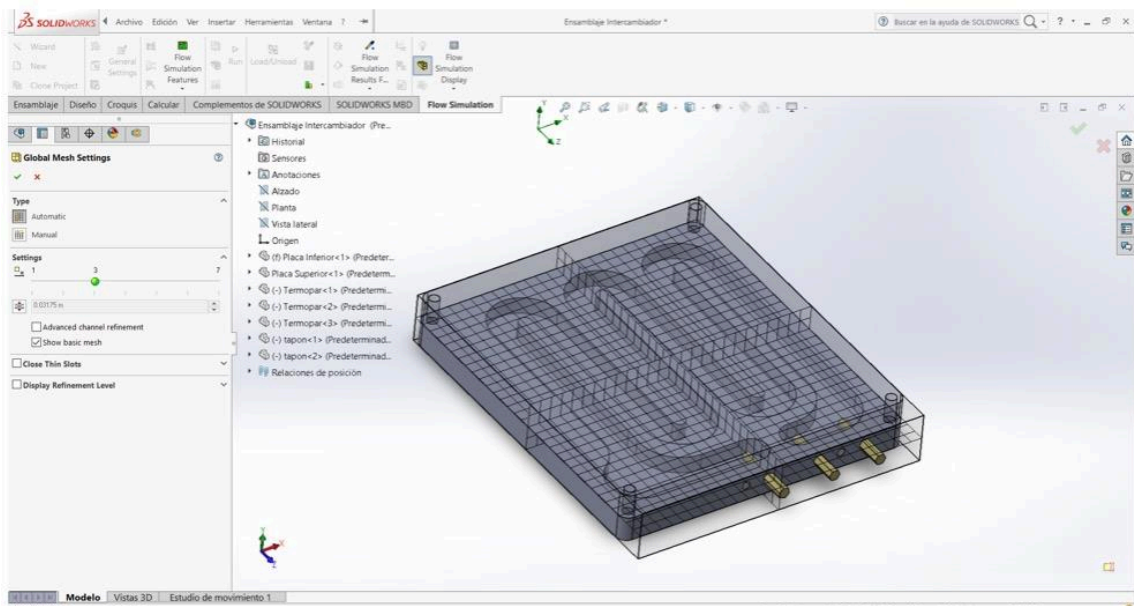


Figura 98. Mallado del modelo total del intercambiador.

16.-Como paso extra se definen metas globales «Global Goals» de temperatura en Sólido y Fluido, esto se realiza porque estamos interesados principalmente en observar cómo se comporta la transferencia de calor en nuestra placa de intercambiador. Para esto se da clic derecho en «Goals», «Insert Global Goals» y se seleccionan las metas de Min, Avg, y Max de Temperatura en Sólido y de Fluido como se puede observar en la imagen.

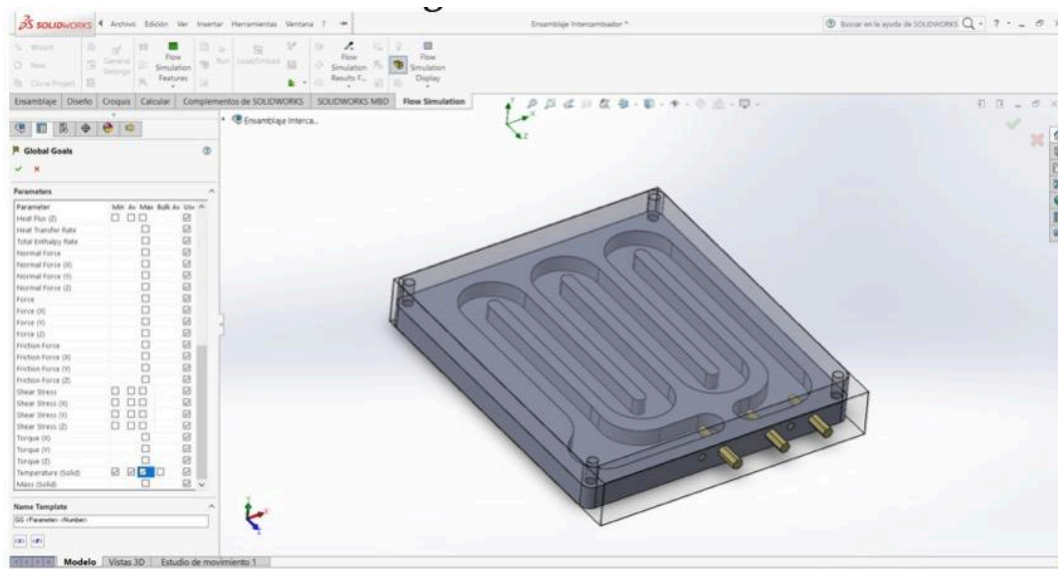


Figura 99. Se definen las metas globales del estudio (Temp. mínima, media y máxima en sólido y en fluido).

17.-Una vez introducidas todas las condiciones para el estudio se prosigue a resolver la simulación para poder obtener los resultados, para esto damos clic en «Run» o Correr el Estudio y de nuevo en «Run».

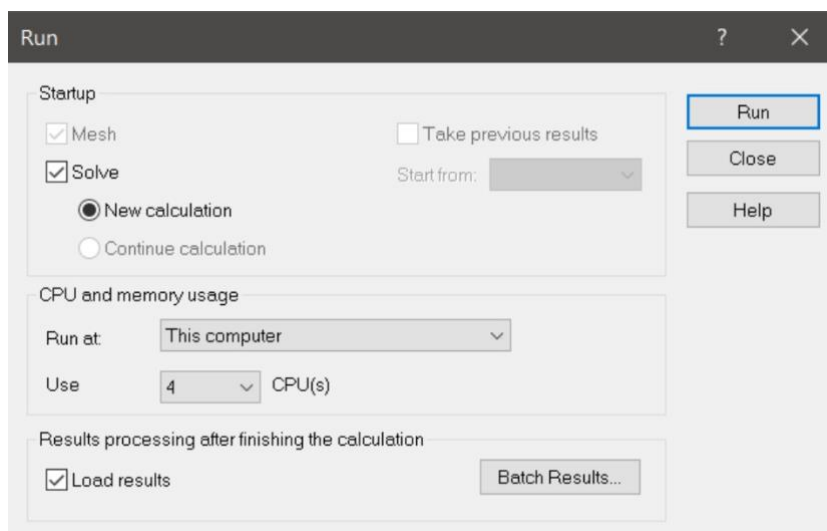


Figura 100. Ventana de inicio para resolución de análisis.

Se desplegará una ventana como se puede observar en la imagen inferior, es la que señala el estatus del proceso, la rapidez con la que se resuelva el proceso depende de las características del ordenador en que se esté haciendo, a mayor capacidad de la máquina más rápido se podrá resolver el estudio, por ser un estudio transitorio y con las características que se incluyeron este estudio es pesado y por lo tanto su solución puede demorarse.

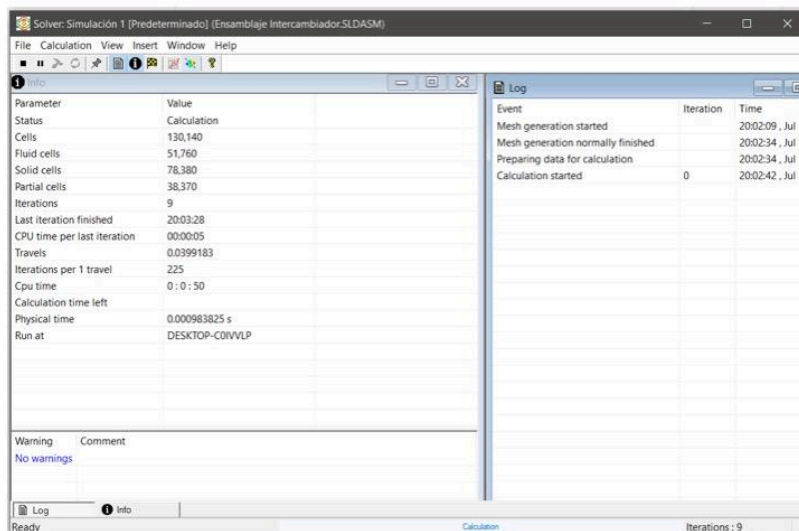


Figura 101. Parámetros de resolución del estudio

18.-Una vez finalizado el estudio se puede observar la siguiente ventana; como se puede observar el estudio tardó 13 horas en completarse para hacer 10 segundos de simulación: Una vez terminado el estudio ahora se puede proceder a obtener los resultados de la prueba:

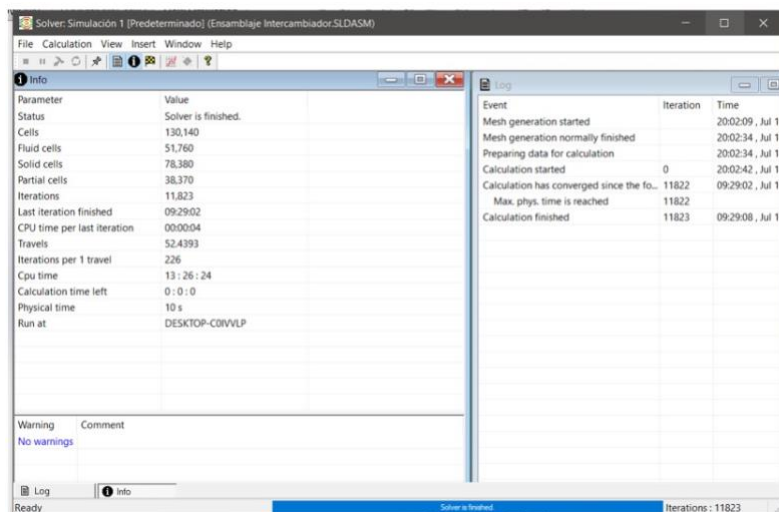


Figura 102. Tiempo total de análisis transcurrido 13 horas 26 minutos, en análisis 1.