

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero  
Mecánico Automotriz.

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DE  
UN VEHÍCULO FORMULA SAE ELÉCTRICO.”**

**Autores:**

Franklin Alberto Cabrera Coronel  
Edison Mauricio Tigre Guncay

**Tutor:**

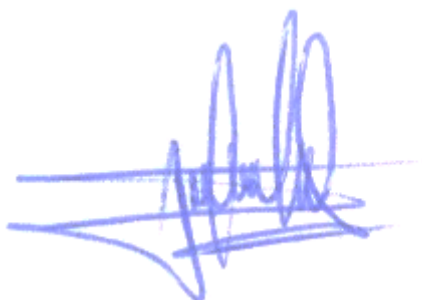
M.I. Jonatan Pozo Palacios

Cuenca-Ecuador  
Diciembre 2016

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Cabrera Coronel Franklin Alberto con documento de identificación N° 0104925003, Tigre Guncay Edison Mauricio con documento de identificación N° 010496746, manifestamos en nuestra voluntad y cedemos a la universidad politécnica salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DE UN VEHÍCULO FSAE ELÉCTRICO**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: ingeniero mecánico automotriz, en la universidad politécnica salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En la aplicación a lo determinado por la ley de propiedad intelectual, en nuestras condiciones de autores nos reservó los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la universidad politécnica salesiana.



Franklin Cabrera Coronel  
C.I. 0104925003



Edison Tigre Guncay  
C.I. 0104967468

## **CERTIFICACIÓN**

Yo declaro que, bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN PARA UN VEHÍCULO FORMULA SAE ELÉCTRICO”, realizado por los autores: Cabrera Coronel Franklin Alberto y Tigre Guncay Edison Mauricio, obteniendo el proyecto técnico que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.



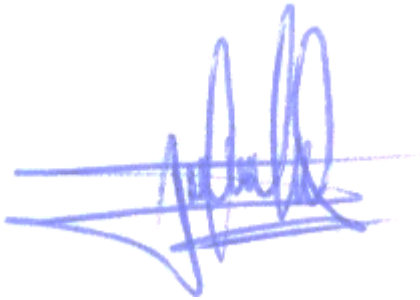
M.I. Jonatan Pozo Palacios

0103994588

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Cabrera Coronel Franklin Alberto y Tigre Guncay Edison Mauricio, autores del proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN PARA UN VEHÍCULO FORMULA SAE ELÉCTRICO”, certificamos que el total contenido de esta investigación es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre 2016



Franklin Cabrera Coronel  
C.I. 0104925003



Edison Tigre Guncay  
C.I. 0104967468

## **DEDICATORIA**

La vida es una suma continua de errores, la virtud del hombre es sobreponerse a cada uno de ellos, batallar contra las adversidades, triunfar sobre uno mismo, no flaquear ante nada, cada derrota nos ayuda a sobreponernos y erguirnos con más fuerza, son palabras que me ayudaron a lo largo de mi formación profesional y este proyecto va dedicado a todos quienes me alentaron con sus sabias palabras.

“Lo poco que he aprendido carece de valor, comparado con lo que ignoro y no desespero en aprender”. Rene Descartes.

*Franklin Alberto Cabrera Coronel*

## **DEDICATORIA**

Este proyecto va dedicado a todas las personas que me apoyaron en este proceso de formación académica, a mi esposa Jesica y a mi hija Karen por ser la fuente de inspiración y fortaleza en los momentos duros de este caminar, a mis padres Luis y Laura por su apoyo incondicional en estos años, a mis hermanas y hermano que formaron y forman parte de cada meta lograda en mi vida.

*Edison Mauricio Tigre Guncay*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco principalmente a mi familia, quienes, con su apoyo en los momentos cruciales de mi carrera, fueron los que me alentaron a continuar.

Principalmente a mis padres; Juan y Teresa, los que me dieron la educación y el apoyo a lo largo de estos años de formación profesional.

Al M.I. Jonatan Pozo quien compartió sus conocimientos, mediante el seguimiento, asesoramiento y guía en el desarrollo de este proyecto.

Al M.I. Cristian García Director de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, quien nos brindó su apoyo y asesoramiento en este proyecto.

*Franklin Alberto Cabrera Coronel*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, a toda mi familia y amigos que me apoyaron durante mi formación profesional y desarrollo de este trabajo previo a la titulación.

Al M.I. Jonatan Pozo, por su tiempo y conocimientos brindados, para el desarrollo de este proyecto técnico.

Al M.I. Cristian García por su colaboración y conocimientos impartidos referentes a temas desarrollados en este proyecto.

*Edison Mauricio Tigre Guncay*



## **RESUMEN**

El presente proyecto técnico surge de la necesidad de implementar los sistemas de refrigeración en el vehículo Formula SAE eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana. Se plantea el diseño y construcción de los sistema de refrigeración que cumplan con las condiciones requeridas tanto por el motor Emrax 228 MV como por el Controlador Bamocar D3, que son los elementos principales en la generación de movimiento del monoplaza.

En primera instancia se realiza una recopilación de fundamentos teóricos, como también se realiza el estado del arte en donde se describen sistemas similares diseñados por otros equipos FSAE electric.

A continuación, se establece una metodología de diseño basada en proyectos vinculados con Formula FSAE, la misma que describe los pasos a seguir en todo el proceso.

Seguidamente se identifican las características de refrigeración de los componentes (motor y controlador) y posteriormente se analizan las posibilidades de implementar dos sistemas por separado o un único sistema.

Consecutivamente se realiza la selección de los elementos del sistema de refrigeración, mediante los cálculos pertinentes. La ubicación de los elementos se determina mediante el diseño de un modelo 3D, y una maqueta de todo el monoplaza.

Finalmente se realizan las pruebas de eficiencia del radiador.

## **ABSTRACT**

This technical project arises from the need to implement the cooling systems in the Formula SAE electric vehicle of the Politecnica Salesiana University. The design and construction of cooling systems that meet the conditions of both the Emrax228 MV engine and the Bamocar D3 Controller are the main elements in the movement generation of the car.

In the first instance, a compilation of theoretical foundations is carried out, as is the state of the art, which describes similar systems designed by other FSAE electric equipment.

Next, a design methodology is established based on projects linked to Formula FSAE, which describes the steps to follow through the process. The cooling characteristics of the components (motor and controller) are then identified and the possibilities of implementing two separate systems or a single system are then analyzed.

The selection of the cooling system elements is then done by means of the relevant calculations. The location of the elements is determined by the design of a 3D model, and a model of the whole car.

Finally, the radiator efficiency tests are carried out.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Importancia y alcances .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
3.1	Objetivo general.....	2
3.2	Objetivos específicos .....	2
<b>4</b>	<b>REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>3</b>
4.1	Formula SAE® .....	3
4.2	Innovación Formula Student.....	4
4.3	Reglamento Formula SAE.....	4
4.3.1	Reglamento sistema de refrigeración y componentes en general.....	4
4.3.2	Reglamento sistema de refrigeración y componentes en general para vehículos eléctricos .....	6
4.4	Sistema de refrigeración .....	7
4.4.1	Partes de un sistema de refrigeración .....	8
4.5	Motor EMRAX 228 MV.....	14
4.6	Controlador Unitek Bamocar D3 .....	16
4.7	Estado del arte en el diseño de sistemas de refrigeración FSAE.....	19
<b>5</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>24</b>
5.1	Metodología de diseño.....	24
5.2	Aplicación de la metodología de diseño .....	25
5.2.1	Reconocimiento de la necesidad.....	25
5.2.2	Establecer los requerimientos de diseño.....	25
5.2.3	Conceptualización .....	25
5.2.4	Evaluación de la viabilidad.....	27
5.2.5	Desarrollo del diseño .....	28
5.2.5.1	Cálculos del sistema de refrigeración .....	29
5.2.5.2	Descripción del sistema de refrigeración.....	41
5.2.5.3	Ubicación de los componentes del sistema.....	42
5.2.5.4	Requerimientos para la instalación del sistema de refrigeración.....	44
5.2.6	Selección de elementos para el sistema de refrigeración .....	46
5.2.7	Producción del prototipo y pruebas .....	51

5.2.7.1	Banco de pruebas .....	51
5.2.7.2	Disposición de los elementos en el prototipo FSAE.....	52
5.2.7.3	Pruebas preliminares .....	53
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>61</b>
6.1	Parámetros más relevantes para la selección de los distintos componentes del sistema... ..	61
6.2	Lista de materiales y costos para la construcción del sistema de refrigeración. 62	
6.3	Disposición de los elementos en el vehículo FSAE eléctrico.....	61
6.4	Banco de pruebas .....	63
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 4.1</b> Vehículo FSAE UPS 2014.....	3
<b>Figura 4.2</b> Sistema de refrigeración. ....	8
<b>Figura 4.3</b> Configuraciones de flujo.....	9
<b>Figura 4.4</b> Partes de un Intercambiador de calor.....	10
<b>Figura 4.5</b> Ventilador. ....	11
<b>Figura 4.6</b> Bomba eléctrica EBP.....	12
<b>Figura 4.7</b> Vaso expansor.....	13
<b>Figura 4.8</b> Mangueras.....	13
<b>Figura 4.9</b> Motor EMRAX 228 MV.....	15
<b>Figura 4.10</b> Curvas de eficiencia, Motor EMRAX 228 HV.....	15
<b>Figura 4.11</b> Controlador Bamocar D3.....	18
<b>Figura 4.12</b> Límite de corriente admisible Controlador Bamocar D3 en función de la temperatura.....	18
<b>Figura 4.13</b> Radiador montado en la parte posterior.....	19
<b>Figura 4.14</b> Sistema de refrigeración equipo KTH.....	20
<b>Figura 4.15</b> Sistema de refrigeración vehículo MY15.....	21
<b>Figura 4.16</b> Sistema de refrigeración FSAE EV 2015.....	21
<b>Figura 4.17</b> Sistema de refrigeración CAT08e/ ETSEIB Motorsport.....	22
<b>Figura 4.18</b> Sistema de refrigeración Amz Racing.....	23
<b>Figura 4.19</b> Sistema de refrigeración E0711-6 Green Team Stuttgart.....	24
<b>Figura 5.1</b> Marco metodológico.....	24
<b>Figura 5.2</b> Configuración de un único sistema de refrigeración.....	26
<b>Figura 5.3</b> Configuración del sistema independiente de refrigeración.....	27
<b>Figura 5.4</b> Geometría del monoplaza para la circulación de aire hacia el radiador. .	30
<b>Figura 5.5</b> Efectividad para los radiadores de flujo cruzado con los dos fluidos de flujo no mezclado.....	36
<b>Figura 5.6</b> Descripción del sistema de refrigeración.....	41
<b>Figura 5.7</b> Elementos del sistema de refrigeración.....	42
<b>Figura 5.8</b> Ubicación del radiador.....	42
<b>Figura 5.9</b> Ubicación de la bomba.....	43
<b>Figura 5.10</b> Ubicación del vaso expansor.....	43
<b>Figura 5.11</b> Ubicación del motor y controlador.....	44

<b>Figura 5.12</b> Radiador Duke 390. ....	47
<b>Figura 5.13</b> Diagrama de Sankey .....	48
<b>Figura 5.14</b> Bomba de agua eléctrica Bosch .....	50
<b>Figura 5.15</b> Ventilador-(a) vista frontal – (b) características. ....	50
<b>Figura 5.16</b> Banco de pruebas. ....	52
<b>Figura 5.17</b> Prototipo FSAE y sistemas auxiliares. ....	52
<b>Figura 5.18</b> Elementos del sistema de refrigeración; (a) Motor Emrax 228 MV (b) Controlador Bamocar D3 (c) Radiador-Bomba de agua. ....	53
<b>Figura 5.19</b> FSAE con motor de combustión .....	54
<b>Figura 5.20</b> Intercambiador de calor FSAE con motor de combustión. ....	55
<b>Figura 5.21</b> Intercambiador de calor FSAE Eléctrico. ....	55
<b>Figura 5.22</b> Puntos referenciales para la toma de datos.1. Entrada del líquido refrigerante. 2- salida del líquido refrigerante. ....	56
<b>Figura 5.23</b> Temperatura superficial del radiador. ....	57
<b>Figura 5.24</b> Firma térmica conjunto intercambiador de calor. ....	59
<b>Figura 5.25</b> Temperatura superficial. ....	59
<b>Figura 5.26</b> Temperatura superficial - Ventilador encendido. ....	60
<b>Figura 6.1</b> Ubicación de los elementos del sistema de refrigeración. ....	62
<b>Figura 6.2</b> Banco de pruebas- sistemas de refrigeración- motor -controlador. ....	64

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b> Especificaciones del motor Emrax 228MV .....	14
<b>Tabla 4.2</b> Especificaciones del Controlador Bamocar D3.....	16
<b>Tabla 5.1</b> Valores de rugosidad para tuberías comerciales nuevas. ....	38
<b>Tabla 5.2</b> Valores calculados para los elementos del sistema de refrigeración.....	41
<b>Tabla 5.3</b> Diámetros de las entradas y salidas de los elementos .....	44
<b>Tabla 5.4</b> Diámetros de los reductores .....	45
<b>Tabla 5.5</b> Matriz de selección intercambiador de calor .....	47
<b>Tabla 5.6</b> Características del radiador. ....	48
<b>Tabla 5.7</b> Matriz de selección bomba de agua.....	49
<b>Tabla 5.8</b> Elementos del sistema de refrigeración. ....	51
<b>Tabla 5.9</b> Materiales y consideraciones para la realización de las pruebas.....	56
<b>Tabla 5.10</b> Datos obtenidos de las pruebas.....	58
<b>Tabla 6.1</b> Parámetros para la selección de los elementos del sistema de refrigeración. ....	61
<b>Tabla 6.2</b> Materiales y costos. ....	63

# 1 INTRODUCCIÓN

El equipo Formula Student de la Universidad Politécnica Salesiana, se ve en la necesidad de utilizar un sistema auxiliar de refrigeración, para el vehículo FSAE eléctrico, para garantizar su correcto desempeño dentro como fuera de la competencia para la cual es diseñado y construido.

Al tratarse de un motor eléctrico la concepción es distinta, pues si bien un motor de combustión interna es más eficiente al trabajar en una temperatura sobre los 90°C, el motor eléctrico es todo lo contrario. Tanto un motor eléctrico del tipo asíncrono, como un controlador trifásico son más eficientes mientras más fríos se encuentren sus componentes internos. Por lo tanto, un sistema de refrigeración que mantenga la temperatura de funcionamiento dentro del rango establecido por los fabricantes de estos dos elementos, permitirá que los mismos trabajen a máxima eficiencia, garantizando el correcto desempeño del monoplaza.

Este proyecto técnico se estructura de la siguiente manera:

Inicialmente se realiza una investigación preliminar de varios equipos de Formula Student de diferentes países, diseños de sistemas de refrigeración, configuraciones de sus componentes y demás elementos, además de un estudio de las normas y reglas que rigen el reglamento de competición de la FSAE.

A continuación, se realiza un estudio minucioso de los componentes que forman parte del sistema de refrigeración, se describe en el estado del arte las características de estos elementos, así como sus diagramas de funcionamiento.

El marco metodológico utilizado se basa en la metodología de diseño de máquinas de Robert Norton, con esta metodología se diseñó el sistema de refrigeración.

Finalmente se presentan pruebas preliminares del intercambiador de calor que fue seleccionado para ser parte de este sistema de refrigeración, además se construye un banco de pruebas, debido a que no se puede realizar las pruebas en el vehículo por cuestiones de tiempo se propone una guía de pruebas para ser realizadas posteriormente



## **2 PROBLEMA**

El vehículo formula SAE eléctrico cuenta con un motor y un controlador, mismos que en su funcionamiento trabajan a diferentes temperaturas, además no deben exceder sus límites. Caso contrario la eficiencia de los mismos decrecerá de manera significativa, causando con esto averías graves a los componentes internos y por ende el mal desempeño del monoplaza en la pista.

### **2.1 Importancia**

La importancia de un sistema de refrigeración radica en sus tres funciones principales que son: calentar el sistema para llegar a su temperatura ideal, eliminar el exceso de calor y mantener la temperatura de trabajo. De esta manera garantiza el correcto funcionamiento de los elementos refrigerados.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo general**

- Diseñar y construir los sistemas de refrigeración de un vehículo formula SAE eléctrico.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Diseñar los sistemas de refrigeración.
- Construir los sistemas de refrigeración.
- Realizar pruebas de funcionamiento de los sistemas de refrigeración diseñados.

## 4 REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 4.1 Formula SAE®

Formula SAE® es un concurso de diseño para estudiantes organizado por SAE International. En 1978 se discutió sobre la adición de un nuevo evento, fundado como el Mini Indi. La primera competencia realizada se dio en el año de 1979, las reglas del concurso permitieron que los estudiantes pudieran trabajar en otros sistemas ya no únicamente en el chasis, llevando estos coches al siguiente nivel de ingeniería. [1]

La competencia Formula SAE/Student, permite a los integrantes de cada uno de los equipos participantes alcanzar un conocimiento dentro del desarrollo ingenieril, comercialización, finanzas, construcción y pruebas que involucran proyectos de gran escala. La construcción de un monoplaza para una competencia, admite y logra abarcar todo un proceso de diseño y arquitectura de un vehículo en el área de la ingeniería automotriz. En la figura 4.1 se aprecia el FSAE UPS 2014.



*Figura 4.1 Vehículo FSAE UPS 2014 [1]*

El concepto detrás de la Fórmula SAE es una empresa de fabricación ficticia que ha contratado un equipo de diseño para desarrollar un pequeño coche de carreras al estilo fórmula. Cada equipo de estudiantes diseña, construye y pone a prueba un

prototipo basado en una serie de reglas cuya finalidad es garantizar las operaciones y promover la resolución de problemas de una manera inteligente. [1].

## **4.2 Innovación Formula Student**

En 2006, la Universidad de Dartmouth (asociada con SAE International) creó el evento combustible alternativo, mediante la competencia de Fórmula Híbrido. Utilizando coches de Fórmula SAE cuyo tren motriz tenía que ser movido por medio de una combinación de combustible (gasolina-electricidad). Desde el año 2010 se realizan competencias de vehículos formula SAE eléctricos, promoviendo así el uso de las nuevas tecnologías y energía limpia, basado en las normas de las competencias del Fórmula SAE Student en los EE.UU, Reino Unido y Alemania. [2]

## **4.3 Reglamento Formula SAE.**

Es indispensable conocer el reglamento establecido por la Sociedad de Ingenieros Automotrices, para que el diseño cumpla con las especificaciones pertinentes. El presente reglamento tiene vigencia para el presente año.

### **4.3.1 Reglamento sistema de refrigeración y componentes en general**

#### **Artículo 8: Sistema de propulsión [3]**

##### **– T8.1 Limitaciones de fluido refrigerante**

Los motores refrigerados por agua sólo deben usar agua como líquido refrigerante. Los motores eléctricos, acumuladores o la electrónica de alta tensión pueden utilizar agua o aceite como refrigerante a base de glicol anticongelante, lubricantes de bombas de agua de cualquier tipo, o cualquier otro aditivo están estrictamente prohibidos.

– **T8.2 Sistema de sellado**

**T8.2.1** Cualquier sistema de refrigeración y de lubricación debe ser sellado para evitar fugas.

**T8.2.5** El vaso expansor debe ser capaz de contener agua a altas temperaturas sin deformación, y estar ubicado hacia atrás de la pared corta fuegos por debajo del nivel del hombro del conductor, y quedar retenido de manera positiva, es decir, no hay bandas de sujeción o cinta.

**T8.2.5** Cualquier vaso expansor en el sistema de refrigeración debe ventilar a través de una manguera con un diámetro interior mínimo de 3 mm (1/8 de pulgada) hasta los niveles inferiores del chasis.

– **Artículo 9: Dispositivos aerodinámicos**

–

**T9.6 Dispositivos de efecto suelo**

Ningún dispositivo de potencia puede ser utilizado para mover o eliminar el aire de debajo del vehículo excepto ventiladores diseñados exclusivamente para la refrigeración.

– **Artículo 4: CABINA**

**T4.5 Carrocería (Firewall)**

**T4.5.1** Una pared corta fuegos debe separar el habitáculo del conductor de todos los componentes del suministro de combustible, el aceite del motor, los sistemas de refrigeración líquida y cualquier sistema de alta tensión. Se debe proteger el cuello del conductor. Debe extenderse suficientemente lejos hacia arriba y / o hacia atrás, de tal manera que cualquier punto a menos de 100 mm (4 pulgadas) por encima de la parte inferior del casco del conductor más alto no será una línea de visión directa con

cualquier parte del circuito de combustible, sistema de refrigeración o el sistema de aceite del motor.

- **Artículo 10: Sistemas de aire comprimido y sistemas hidráulicos de alta presión.**

### **T10.2 Bombas de alta presión y tuberías hidráulicas**

El conductor o cualquiera que esté fuera de la cabina deberán estar protegidos de cualquier bomba hidráulica y líneas con presiones de línea de 2100 KPa (300 psi) o superior. Las protecciones deben ser de acero o de aluminio con un espesor mínimo de 1 mm (0,039 pulgadas).

- **Artículo 11: Sujetadores**

–

### **T11.1 Requerimientos de sujetadores**

**T11.1.1** Todos los sujetadores roscados utilizados en la estructura del conductor, así como la dirección, frenos, sistemas de arneses y suspensión, deben cumplir o superar, SAE grado 5, grado métrico 8.8 y / o especificaciones AN / MS.

### **4.3.2 Reglamento sistema de refrigeración y componentes en general para vehículos eléctricos**

- **Artículo 3: Sistema de tracción - Almacenamiento de energía**

–

### **EV3.4 Contenedor del acumulador del sistema de tracción - Configuración mecánica**

**EV3.4.12** Agujeros, tanto internos como externos, en el contenedor sólo se permiten para el cableado, ventilación, refrigeración o sujetadores. Los orificios externos deben ser sellados.

– **Artículo 9: Forma de sistemas eléctricos y (ESF)**

**EV9.1 Formulario del Sistema Eléctrico (ESF)**

**EV9.1.2** El FSE debe visualizar la interconexión de todos los componentes eléctricos, incluyendo el nivel de tensión, la topología, el cableado en el coche y la construcción del acumulador.

**4.4 Sistema de refrigeración**

El sistema de refrigeración es un conjunto de elementos y fluidos cuya misión es la de regular la temperatura de partes críticas de un dispositivo, además de proteger las partes que conforman el mismo. Con ello se garantiza el correcto funcionamiento, como también, la disminución de pérdidas por generación de calor.

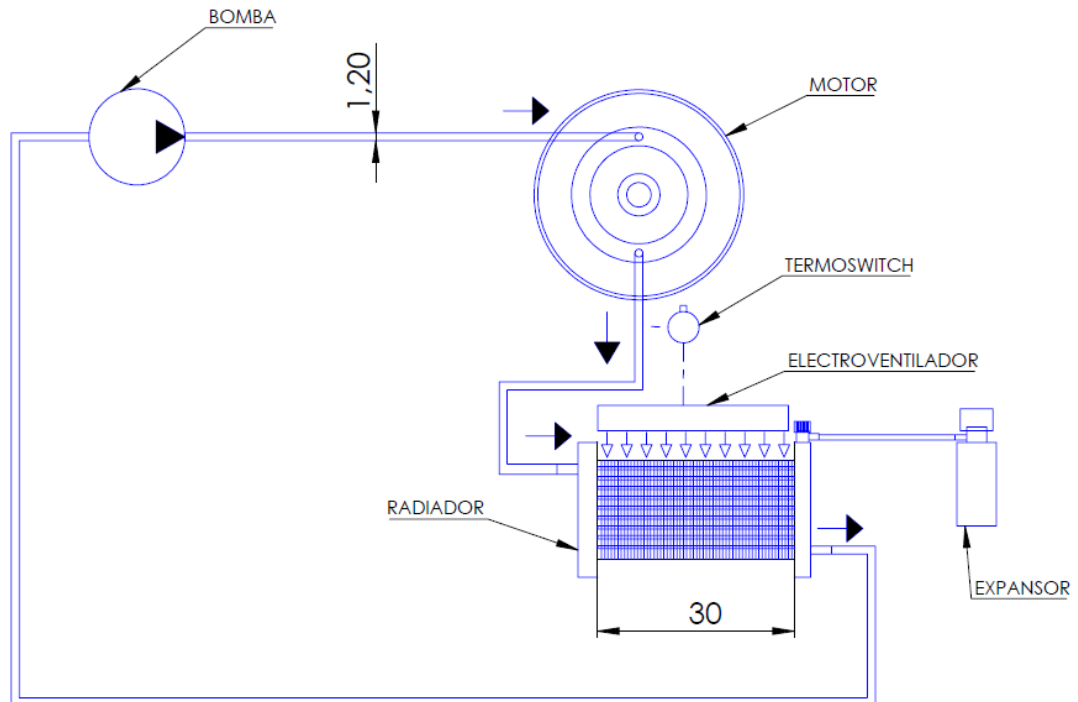
La refrigeración puede ser de dos tipos: refrigeración por agua y refrigeración por aire; en la refrigeración por agua, el líquido se encarga de extraer el calor generado debido al funcionamiento de los componentes. Otro tipo de sistema es la refrigeración por aire, que se da generalmente en motocicletas y vehículos pequeños cuyos motores van dispuestos horizontalmente. Habitualmente son motores fríos, y aprovechan el aire que fluye a través de ellos para refrigerarse.

Los componentes eléctricos tales como motores, controladores, acumuladores, etc., necesitan refrigeración debido a que generan calor como resultado de las pérdidas eléctricas y mecánicas dentro de los mismos. El calor es el principal agente que produce la degradación gradual del aislamiento, ya que deteriora los enlaces internos de los materiales aislantes, debido al debilitamiento de las uniones.

Si se permite que un motor opere a una temperatura 10°C por encima de su temperatura de diseño, se reducirá la expectativa de vida de dicha máquina en un 50 %. Si nuevamente se opera la máquina con 10 °C por sobre este valor ya aumentado, se reduce otro 50 % el resto de la expectativa de vida. Esto se conoce como la "regla de la mitad de la vida". [4]

#### 4.4.1 Partes de un sistema de refrigeración

Un sistema de refrigeración está conformado por varios elementos, mismos que permitirán cumplir con la misión de todo el sistema. En la figura 4.2 se observa el esquema de un sistema completo, con sus respectivas partes.



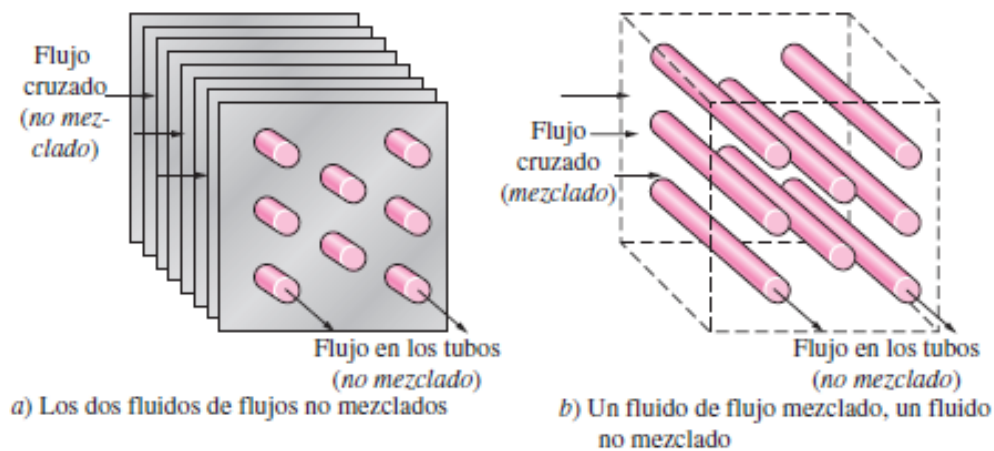
*Figura 4.2 Sistema de refrigeración.*

#### Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas y evitando al mismo tiempo que se mezclen entre sí. Los intercambiadores compactos permiten lograr razones elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño. Los dos fluidos suelen moverse de manera perpendicular entre sí y a esa configuración de flujo se le conoce como flujo cruzado. El cual todavía se clasifica más como flujo no mezclado o mezclado dependiendo de la configuración. [5]

En la figura 4.3 a) se dice que el flujo cruzado es no mezclado en virtud de que las aletas de placa fuerzan al fluido a moverse por un espaciamiento particular entre ellas e impiden su movimiento en la dirección transversal (es decir, paralelo a los tubos).

En la figura 4.3 b) el flujo cruzado que se ilustra es mezclado, dado que el fluido ahora tiene libertad para moverse en la dirección transversal.



*Figura 4.3 Configuraciones de flujo. [5]*

Un intercambiador de calor está formado por varias partes como son:

### **Tubos**

Es el medio por donde circula el líquido refrigerante, que se encarga de extraer el calor generado por los componentes; dichos tubos son refrigerados por medio de las aletas.

### **Aletas**

Es una lámina de cobre en forma de acordeón o lineal que se encuentra ubicada entre los tubos, las aletas hacen posible la generación de turbulencia de aire cuando esta pasa por el radiador. Su función es canalizar el aire para la disipación de calor.

### **Colectores**

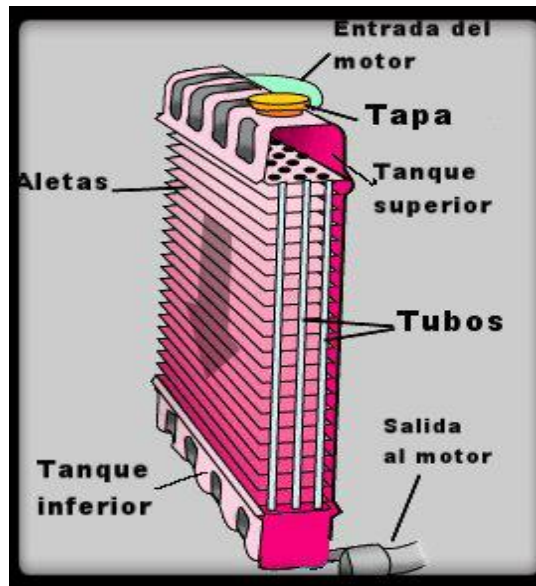
Es una lámina de latón o cobre, debidamente confeccionada, colocada en la parte superior e inferior del radiador, donde van soldados los tanques y los tubos.



## Tanques

Es el componente por medio del cual se conecta la manguera de entrada o de salida de agua provenientes del elemento refrigerado, estos pueden ser de cobre o plástico para los radiadores de aluminio. [6]

En la figura 4.4 se ilustran los componentes mencionados.



*Figura 4.4 Partes de un Intercambiador de calor. [6]*

## Ventilador

Es un elemento fundamental dentro de los sistemas de refrigeración automotrices, su misión es enviar o succionar el aire a través del radiador mediante aletas (figura 4.5), sobre todo en altas cargas. Dentro de las funciones del ventilador: la principal es mantener la temperatura del agua de refrigeración dentro de un rango óptimo. Con esto se evita el sobrecalentamiento del motor, además regula la corriente de aire a medida del régimen y de la necesidad del motor. [7]



*Figura 4.5 Ventilador. [7]*

### **Bomba de agua**

Las bombas son generadores hidráulicos, proporcionan energía hidráulica a un líquido que bombean por una tubería. Las mismas actúan en dos fases una de impulsión y otra de aspiración.

Las bombas proveen presión, regularmente expresada como altura, de líquido. Las mismas son capaces de aspirar desde un depósito que este situado a un nivel inferior al suyo. [23]

Características de la bomba:

- El fluido las atraviesa de forma continua.
- Suministran caudales altos
- Suministran presiones moderadas
- Su rango de caudal es cada vez más amplio.
- Son de construcción sencilla, no requieren tolerancias estrictas.
- Son compactas y de poco peso.
- Silenciosas y con pocas vibraciones.

### **Caída de presión de la bomba de agua**

Se pone particular atención a la fricción, que se relaciona directamente con la caída de presión y las pérdidas de carga, durante el flujo a través de tuberías y ductos. Por

lo tanto, la caída de presión se utiliza para determinar la potencia necesaria de bombeo.

La velocidad del fluido cambia de cero en la superficie, hasta una velocidad máxima en el centro de la tubería.

La velocidad promedio en aplicaciones de enfriamiento y calentamiento puede variar un poco, debido a las transformaciones en la densidad, que crea la temperatura.

La fricción entre las partículas del fluido en una tubería ocasiona una ligera elevación en la temperatura del fluido, como resultado de la transformación mecánica en energía térmica sensible, este aumento de temperatura debido al calentamiento por fricción es muy bajo para garantizar cualquier consideración en los cálculos y por ende se los pasa por alto. [24]



*Figura 4.6 Bomba eléctrica EBP [8].*

### **Vaso expansor**

Este elemento es el encargado de absorber el aumento del volumen del agua del radiador producido al expandirse por el incremento de temperatura (figura 4.7). Por otro lado, aporta el líquido refrigerante al sistema cuando este se enfría.



*Figura 4.7 Vaso expansor.*

### **Mangueras**

Son los elementos tubulares (figura 4.8) encargados de transportar el líquido refrigerante por todo el sistema de refrigeración, los materiales son distintos según las aplicaciones para las que se les emplee.



*Figura 4.8 Mangueras*

### **Líquido refrigerante**

El refrigerante es fundamental dentro de los sistemas de refrigeración, es el elemento encargado de absorber el calor generado a altas temperaturas, y también aporta calor cuando el sistema necesita alcanzar la temperatura de trabajo. Como refrigerante se puede utilizar agua o algún elemento químico que brinde las características necesarias para mantener el sistema trabajando en óptimas condiciones.

#### 4.5 Motor EMRAX 228 MV

Es un motor de flujo axial, fabricado por la compañía ENSTROJ, sin escobillas sincrónico trifásico de corriente alterna. Es un motor eléctrico de alta potencia, alto par, extremadamente ligero, de accionamiento directo, bajo nivel de ruido y una eficiencia de hasta un 98%, véase figura 4.9. El motor funciona a altas rpm, de esta manera permite obtener una potencia de hasta 200 KW. El motor EMRAX también entrega un par más elevado a altas RPM, con una unidad de reducción.

A continuación, se exponen ciertas características de este motor:

*Tabla 4.1 Especificaciones del motor Emrax 228MV [9]*

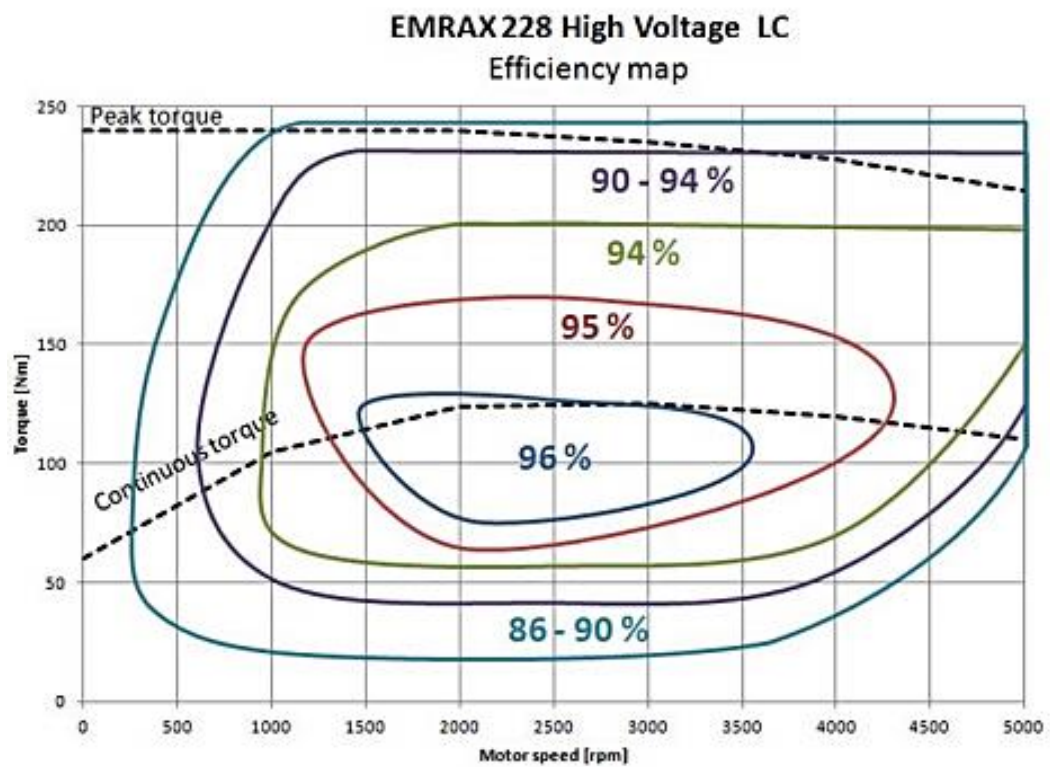
Especificaciones del motor	
<b>Fabricante</b>	Enstroj
<b>Modelo</b>	Emrax 228 MV
<b>Potencia máxima</b>	100 KW
<b>Tipo de refrigeración</b>	Enfriamiento por agua.
<b>Flujo de agua mínimo</b>	8 Lpm
<b>Presión mínima en la entrada</b>	1,2 bar
<b>Temperatura de operación</b>	-30 °C --- 120°C
<b>Temperatura del líquido ref.</b>	menor a 40 °C
<b>Eficiencia del motor</b>	93-98%

El sistema de refrigeración por líquido en el motor permite obtener un mejor enfriamiento y por tanto mayor eficiencia. El flujo de líquido de refrigeración es de: 8 l/min a la entrada, con una temperatura máxima de 40 °C, la presión mínima del sistema a la entrada debe ser de 1,2 bares. El flujo del líquido a la entrada no debe exceder de 2 bares. [9]



**Figura 4.9** Motor EMRAX 228 MV [9]

En la figura 4.10 se describe gráficamente la eficiencia del motor EMRX 228 MV con refrigeración líquida. Se observa que la eficiencia del motor, está determinada por el torque generado y la velocidad (rpm) del motor.



**Figura 4.10** Curvas de eficiencia, Motor EMRAX 228 HV [9]

#### 4.6 Controlador Unitek Bamocar D3

El controlador RS 810 Unitek D3 Bamocar D3-400-400, es fabricado por Unitek Industrie Elektronik (figura 4.10). Además de cumplir con los requisitos de potencia, el controlador de motor Unitek ofrece una serie de beneficios: en primer lugar, que el motor Emrax 228 se empareje con éxito al controlador, tiene un peso de 8,5 kg. Además, requiere de refrigeración líquida debido a los requisitos de alta potencia del sistema en general.

Algunas características se observan en las siguientes especificaciones:

*Tabla 4.2 Especificaciones del Controlador Bamocar D3 [10]*

<b>Data Bamocar D3-400-(700)</b>	<b>Dim.</b>	<b>125/250</b>	<b>200/400</b>	<b>125/250</b>	<b>200/400</b>
<b>Supply voltage, rated value</b>	V	24 up to máx 400		24 up to máx 700	
<b>Max. output voltage, rated value</b>	V eff	up to 3x260		up to 3x450	
<b>Continuous current</b>	A eff	125	200	125	200
<b>Max. peak current</b>	A lo	250	400	250	400
<b>Max. power loss</b>	Kw	2	3	2.6	4
<b>Pulse frequency</b>	Khz	8-24		8-16	
<b>Over-voltage switching threshold</b>	V	440		800	
<b>Input fuse</b>	A	160	250	160	250
<b>Weight</b>	Kg	8.5			
<b>Dimensions h x w x d</b>	Mm	403x250x145			
<b>Size</b>		2			
<b>conditions</b>					

<b>Protection rating</b>	IP 65
<b>Standards</b>	EN60204, ISO 16750 , EN61800, IEC60146
<b>Protection class</b>	
<b>Over-voltage</b>	+10%
<b>Operating temperature range</b>	-10 to +45°C
<b>Extended operating temperature range</b>	-30 to 65°C from +45°C to +65°C performance reduced by 2%/°C
<b>Storage and transport</b>	-30°C to +80°C EN60721
<b>Installation altitude</b>	≤ 1000m above sea level 100 %, >1000m performance reduced by 2%/100m
<b>Cooling</b>	Liquid cooling unit max. 65°C, 12 l/min, pressure max. 1.3 bar
<b>Mounting position</b>	independent
<b>Contamination</b>	Contamination degree 2 acc. to EN 61800-5-1
<b>Vibration</b>	10Hz to 58Hz ampl. 0.075mm (IEC 60068-2-3) 58Hz to 200Hz 1g
<b>Shock</b>	15g for 11ms
<b>Environmental conditions</b>	<b>Not permissible:</b> condensation (dew), ice formation, oil mist, salt spray, water
<b>Humidity</b>	class F, humidity <85% <b>condensation not allowed</b>

Las características de refrigeración del controlador requieren de una temperatura máxima de funcionamiento de 65 °C, el rango de temperatura de operación extendida es de -30 a 65 °C. Desde los 45 °C a 65 °C el rendimiento se ve reducido en un 2 % / ° C. El caudal de agua en la entrada debe ser de 12 l/min a una presión de 1,3 bares.

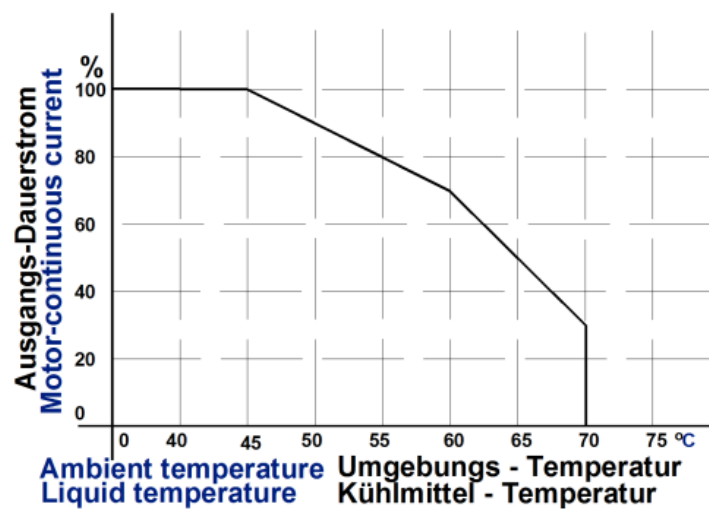


Por lo tanto, para garantizar la eficiencia del controlador, el rango de temperatura de operación debe ser de -10 a 45 °C. [10]



*Figura 4.11* Controlador Bamocar D3. [10]

La figura 4.12 indica el límite de corriente admisible en función de la temperatura del refrigerante, es decir que el porcentaje de corriente enviada al motor es del 100 %, siempre y cuando la temperatura del controlador sea menor a 45 °C.



*Figura 4.12* Límite de corriente admisible Controlador Bamocar D3 en función de la temperatura. [10]

#### 4.7 Estado del arte en el diseño de sistemas de refrigeración FSAE.

La Formula Student Germany es una de las pocas competencias que hacen referencia o mencionan algo en cuanto a juzgar los sistemas de refrigeración en materia de diseño. Los mismos que dan pautas y recomendaciones acerca de los sistemas de enfriamiento, las cuales se detallan a continuación.

El sistema de refrigeración es un parámetro que se inspecciona cuidadosamente. A los equipos que montan el radiador en la parte trasera (Figura 4.13) del coche se les pedirá en primer lugar información acerca de los problemas de transferencia de calor, y sobre el momento polar de inercia.

Un radiador y sus mangueras llenas de agua y probablemente un ventilador montado agregarán una masa significativa en el extremo posterior del coche. No solo eso, el aire que llega al radiador se precalienta a medida que pasa sobre el motor. [11]



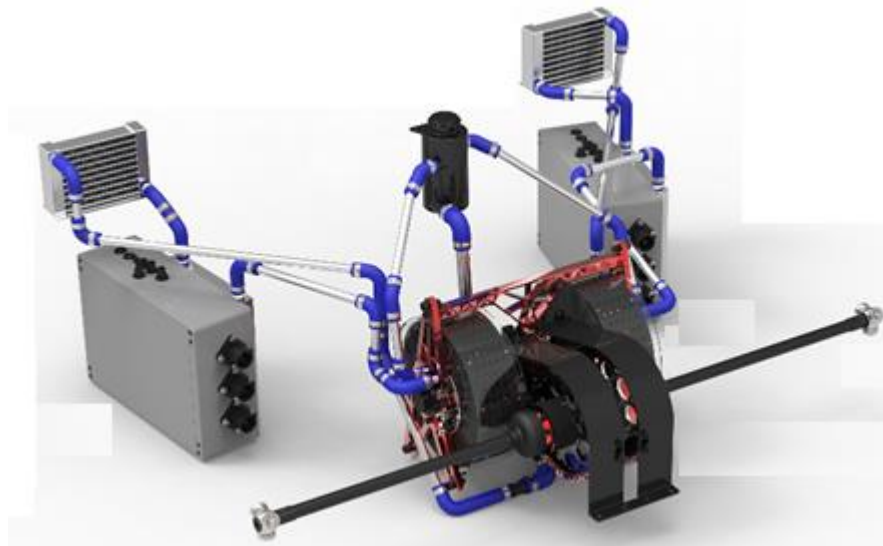
*Figura 4.13 Radiador montado en la parte posterior. [11]*

Los equipos que presenten un coche sin un ventilador de refrigeración deberán justificar con un buen argumento la omisión del mismo. [11]

El equipo KHT Formula Student son estudiantes de las diferentes carreras del “The Royal Institute of Technology” en Estocolmo, Suiza. Gran parte de su trabajo consiste en la planificación, la construcción de relaciones con la industria, la práctica

de la ingeniería de diseño y fabricación. Los estudiantes adquieren experiencia práctica mediante este proyecto, especialmente en la gestión del trabajo en equipo y el tiempo, que deben ser aplicables y valorado en cualquier campo de la ingeniería.

El sistema de refrigeración de este monoplace, es un sistema paralelo como se observa en la figura 4.14, con dos radiadores que están enfriando cada uno de forma inversa tanto el controlador como el motor. El agua se mezcla en el depósito de desbordamiento de ambos, dando al sistema un enfriamiento uniforme, para garantizar la seguridad del conductor en caso de fallo de la cadena de transmisión, un escudo de dispersión hecho de acero de 3 mm está unido sobre dicha cadena. [2]



*Figura 4.14 Sistema de refrigeración equipo KTH [2]*

El equipo MIT MOTORSPORT FSAE ELECTRIC del Instituto de Tecnología de Massachusetts, indica el concepto general del vehículo **MY15**, la construcción del tren motriz está conformado por dos motores eléctricos, los mismos que se encargan de generar el movimiento de manera independiente en cada rueda posterior.

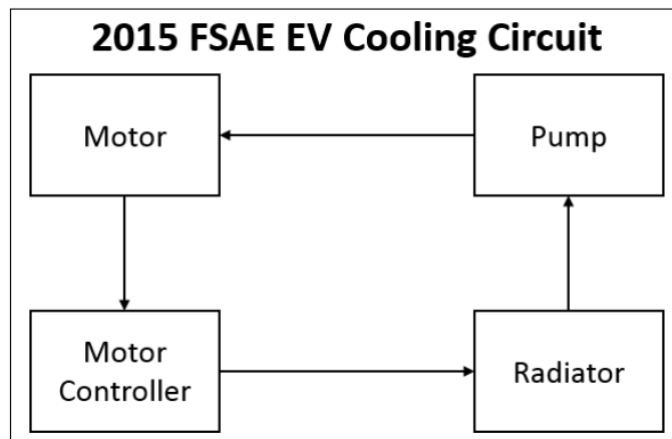
El sistema de refrigeración está compuesto de un solo radiador (figura 4.15) que se encarga de la evacuación de calor de estos elementos. El radiador está localizado en la parte lateral del vehículo. Los elementos sometidos a refrigeración son: dos motores EMRAX ESTÁNDAR LC, PMSM y sus respectivos controladores UNITEK BAMOCAR D3. [12]



**Figura 4.15** Sistema de refrigeración vehículo MY15 [12]

La Universidad Politécnica de Ohio, diseña un circuito de refrigeración para el FSAE EV 2015, el mismo consta de un solo circuito de refrigeración, para mantener la temperatura del motor EMRAX 228 HV y el controlador UNITEK BAMOCAR D3. La configuración de este sistema se ilustra en la figura 4.16

Se ha decidido que la configuración del sistema de refrigeración conste de una bomba de agua eléctrica, el motor, el controlador y el radiador, en ese orden respectivamente. [13]

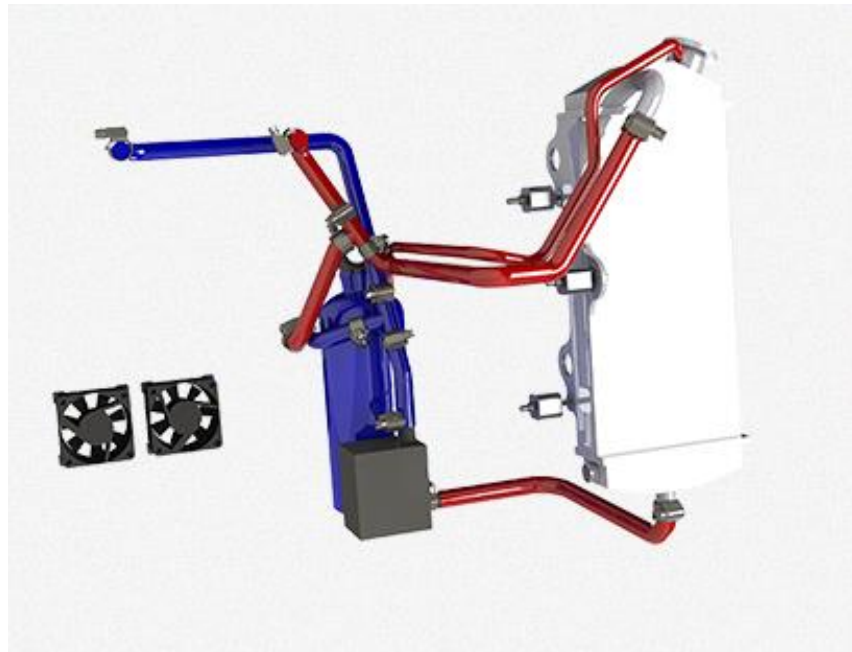


**Figura 4.16** Sistema de refrigeración FSAE EV 2015 [13]

El equipo ETSEIB Motorsport de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona diseña un sistema de refrigeración que se encarga de

mantener el monoplaza y sus componentes a la temperatura óptima de trabajo y evitar sobrecalentamientos. Concretamente, el sistema de refrigeración del Cat08e garantiza una temperatura de trabajo adecuada en las baterías, inversor, motor y transmisión. [14]

El líquido refrigerante fluye a través del radiador, atravesando el inversor, motor y la transmisión como se menciona en el apartado anterior. El sistema cuenta con un radiador y dos ventiladores, que fuerzan el paso del aire al radiador para así conseguir una temperatura óptima de trabajo. En la figura 4.17 se observa la disposición que este equipo ha usado en su vehículo.



**Figura 4.17** Sistema de refrigeración CAT08e/ ETSEIB Motorsport [14]

El equipo de AMZ Racing implementó la regeneración energética en su primer coche eléctrico Furka en 2010, con el vehículo denominado Julier en el 2013 ha ido evolucionando considerablemente en este aspecto. Este coche cuenta con un sistema con freno regenerativo, debido al cambio de 2WD a 4WD, por lo que tiene mayor posibilidad de recuperar energía, en función de transferencia de peso en la frenada.

El equilibrio de los frenos se da entre un quinto y un tercio en el eje trasero, esto significa que un coche 4WD puede recuperar tres a cinco veces más energía de freno.

El coche se construye con cuatro motores idénticos no solo por simplicidad, sino también para proporcionar suficiente Par frontal durante el frenado. [15]

En la figura 4.18 se observa el tren de transmisión del Julier (AMZ RACING). Se puede apreciar que el monoplaza cuenta con dos radiadores, para la disipación de calor de los cuatro motores, los controladores y el acumulador, los mismos que están dispuestos uno a cada lado del vehículo.



*Figura 4.18 Sistema de refrigeración Amz Racing [15]*

El GreenTeam es uno de los dos equipos Formula Student de la Universidad de Stuttgart de Alemania, fue fundado en 2009 por ex miembros de la Rennteam (el otro equipo de la Formula Student en la Universidad de Stuttgart). La razón de esto fue la creación de la nueva FSE (Formula Student Electric) para vehículos con tracción puramente eléctrica. [16]

El sistema de refrigeración de este monoplaza, dispone de un solo radiador encargado de disipar el calor producido por los 4 motores y sus respectivos controladores como se puede observar en la figura 4.19. Los motores van dispuestos en cada lado del monoplaza anteriores a los neumáticos. Este es un sistema optimizado de refrigeración debido a que posee un solo radiador.

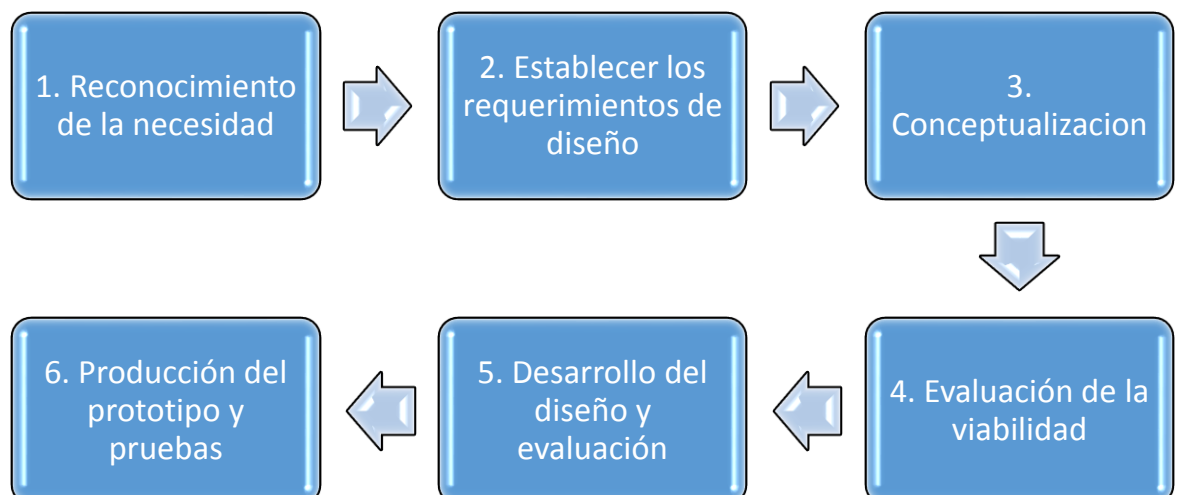


*Figura 4.19* Sistema de refrigeración E0711-6 Green Team Stuttgart [16]

## 5 MARCO METODOLÓGICO

### 5.1 Metodología de diseño

La metodología de diseño aplicada consta de 6 pasos (figura 5.1), el cual abarca los ámbitos esenciales dentro de la ingeniería, y sobre todo permite regresar a un estado previo en el caso que el diseño presente anomalías. A continuación, se detalla dicha metodología:



*Figura 5.1* Marco metodológico.

## **5.2 Aplicación de la metodología de diseño**

### **5.2.1 Reconocimiento de la necesidad**

El FSAE requiere de un sistema de refrigeración para el motor EMRAX 228 MV y para el controlador Bamocar D3, que garanticen el óptimo funcionamiento de los mismos.

### **5.2.2 Establecer los requerimientos de diseño**

El sistema de refrigeración debe satisfacer los requerimientos que se mencionan a continuación:

- Temperatura de entrada del controlador (-10 a 45° C).
- Presión de entrada del controlador (máx. 1.3 bar).
- Flujo de líquido refrigerante a controlador (12 Lpm máx.).
- Temperatura de entrada del motor (< 40 °C).
- Presión de entrada del motor (1.2 – 2 bar máx.).
- Flujo de líquido refrigerante del motor (8 Lpm).
- Dimensión máx. para el radiador (12 x 6 pulgadas).
- Permitir la desgasificación del refrigerante mediante un medio expansor.
- Adaptarse a las diferentes condiciones meteorológicas, por lo tanto, debe ser lo suficientemente robusto y fiable.
- Ser fácilmente desmontable para actividades de mantenimiento.
- Ser lo suficientemente seguro para el conductor del monoplaça.

### **5.2.3 Conceptualización**

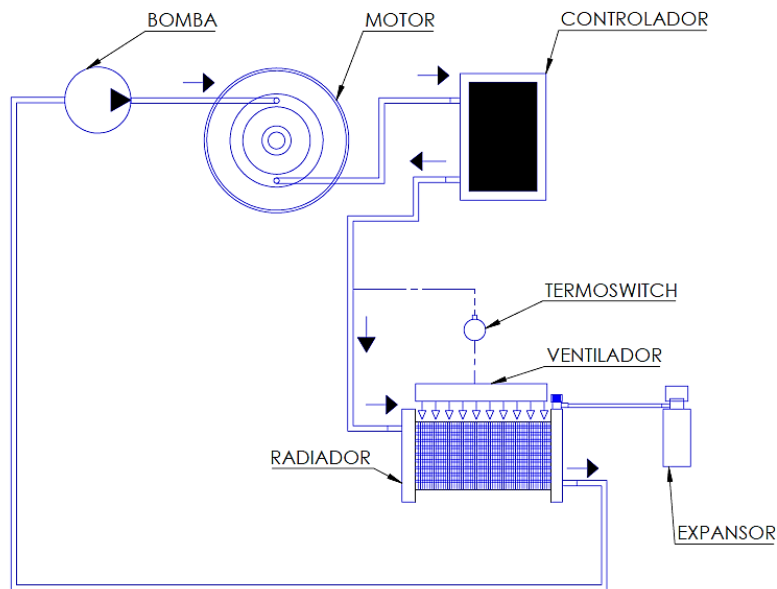
Diseñar y construir dos sistemas que permitan trabajar al motor y controlador dentro de las temperaturas ideales de funcionamiento. Este sistema debe ajustarse al diseño del monoplaça como también debe cumplir la reglamentación pertinente.

En primera instancia se generan ideas acerca de los diseños que podrían resolver el problema planteado:



## Un solo sistema

Un único sistema permite que el mismo sea más compacto, así también se obtiene un valor relativamente bajo de consumo energético. El sistema cuenta con una bomba que impulsa el refrigerante en primera instancia hacia el motor por ser este el que trabaje a mayores temperaturas que el controlador, seguidamente el circuito continuo hacia el controlador, terminando en el radiador de flujo cruzado, a partir del radiador se repite nuevamente el ciclo. El accionamiento de un único ventilador permite que la temperatura sea controlada. El sistema debe ser lo suficientemente robusto para cubrir las necesidades de los dos elementos en conjunto.

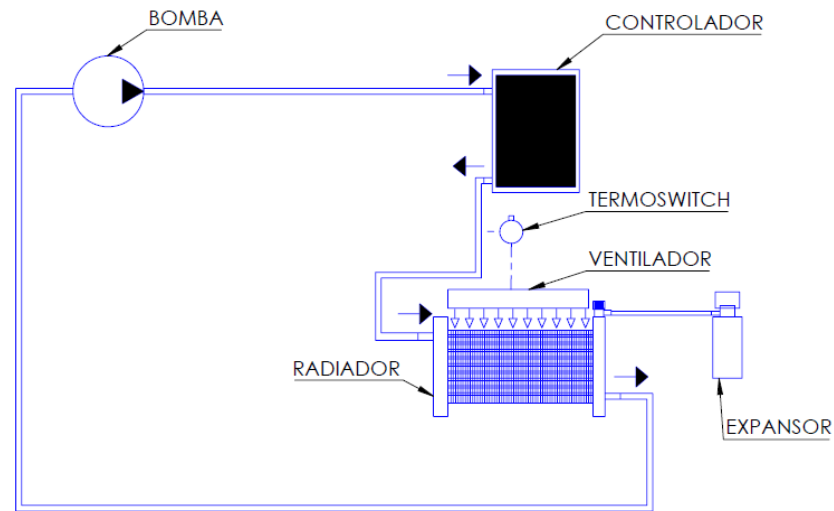


*Figura 5.2 Configuración de un único sistema de refrigeración.*

## Dos sistemas independientes

La aplicación de dos sistemas independientes, en cierta manera abarca una mayor cantidad de componentes y mayor consumo energético, pero presenta sus ventajas frente al sistema descrito anteriormente. Las temperaturas de funcionamiento son controladas por separado, por lo tanto, los componentes de refrigeración disminuyen en cuanto a dimensiones se refiere, aprovechando de mejor manera el diseño del monoplaza, por lo que cada radiador se localiza en cada pontón del monoplaza.

Los electroventiladores son accionados por separado dependiendo de las condiciones de cada sistema. En la figura 5.3 se observa la configuración para el controlador y en la figura 4.2 se observa la configuración para el motor.



*Figura 5.3 Configuración del sistema independiente de refrigeración.*

#### **5.2.4 Evaluación de la viabilidad**

Para llegar a determinar una configuración del sistema de refrigeración que nos permita y garantice las necesidades que se plantean en el diseño, se opta por comparar las ventajas y desventajas de los sistemas planteados.

##### **Único sistema (motor y controlador)**

##### **Ventajas:**

- Menor costo que el sistema independiente.
- Menor consumo de energía, al ser menor el número de elementos que se usan en este sistema.

##### **Desventajas:**

- Espacio limitado para la instalación de los componentes del sistema; lo que implica una configuración acorde con otros elementos del monoplaza.

- Temperaturas de trabajo combinadas, esto repercute mucho en el rendimiento tanto del motor y controlador dependiendo como se realice la configuración.

En caso de que ocurriera una posible avería, en cualquier elemento todo el sistema se vería afectado.

### **Sistemas independientes (motor - controlador).**

#### **Ventajas:**

- Menor temperatura de trabajo, esto es una gran ventaja ya que se puede manipular para trabajar a temperaturas independientes y manteniendo su rendimiento lo más elevado posible.
- Fácil configuración, la disposición tanto para el motor y controlador es la misma, bomba - motor / controlador – radiador. Esto es muy ventajoso para la corrección de averías y mantenimiento.

#### **Desventajas:**

- Requiere de un espacio mayor para la instalación de los componentes.
- Costo elevado, el valor aumenta debido a que se requieren el doble de elementos que, en el único sistema, pero garantiza el óptimo rendimiento.
- Mayor consumo de energía, esta es otra desventaja debido al número de elementos empleados

### **5.2.5 Desarrollo del diseño**

Para iniciar el desarrollo del diseño se concluye que lo más conveniente es un único sistema debido a que se dispone de espacio limitado en el vehículo, se pretendía colocar sistemas independientes, con los radiadores en cada pontón, pero uno de los mismos ya cuenta con la disposición para otros componentes eléctricos. Otro de los parámetros que influye para esta decisión es la cantidad de elementos que permiten un ahorro energético, frente al otro sistema propuesto.

### 5.2.5.1 Cálculos del sistema de refrigeración

#### Potencia a disipar

En primera instancia se determina la potencia a disipar generada por el motor y el controlador. La potencia máxima con la que trabaja el motor es de 80 KW. Dado que la eficiencia del mismo está entre 93% y 98 % (véase figura 4.10), se utiliza una media de 95 % para el cálculo, se considera que la eficiencia restante se pierde en calor, Por lo tanto, la potencia a disipar del motor se calcula mediante la fórmula de potencia a disipar. [13]

$$\dot{Q}_{disipar} = P_{m\acute{a}xima} * (1 - \eta) \quad (5.1)$$

Para el caso de todo el sistema de refrigeración, la potencia calorífica a disipar se determina con la fórmula 5.2, tomando en cuenta que la eficiencia del controlador es del 97%, véase figura 4.10.

$$\dot{Q}_{disipar} = P_{m\acute{a}xima} * (1 - \eta_{motor} * \eta_{controlador}) \quad (5.2)$$

$$\dot{Q}_{disipar} = 80 \text{ KW} * (1 - 0,95 * 0,97)$$

$$\dot{Q}_{disipar} = 6,28 \text{ KW}$$

Se corrige el valor de la potencia a disipar con un factor de seguridad de 1,1, esto debido al continuo ensuciamiento del radiador. [17]

$$\dot{Q}_{refrig} = \dot{Q}_{disipar} * 1,1 \quad (5.3)$$

$$\dot{Q}_{refrig} = 6,28 \text{ kw} * 1,1$$

$$\dot{Q}_{refrig} = 6,91 \text{ KW}$$

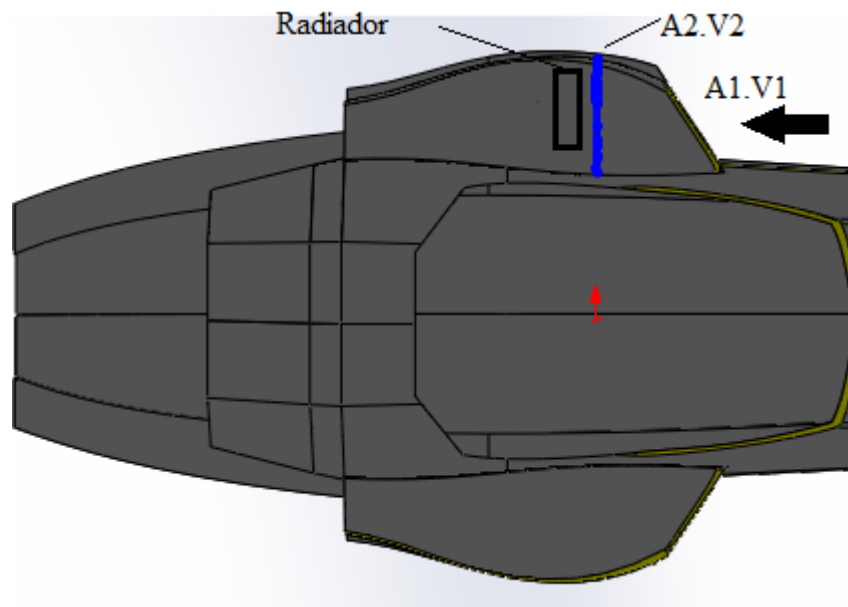
El valor de potencia a disipar de asemeja al valor obtenido por otros equipos como es el caso del IIT Bombay Racing, cuya potencia a disipar de su modelo 2014 es de 4,5 KW. [18]

El calor transmitido por el aire circundante se toma igual que el valor de la potencia a disipar por el refrigerante

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{Q}_{refrig}$$

### Cálculos del radiador

El flujo másico de aire que circula a través del radiador, se calcula por medio de la ecuación de Bernoulli, el aire fluye inicialmente por la entrada del pontón hacia la salida donde va ubicado el radiador.



**Figura 5.4** Geometría del monoplaza para la circulación de aire hacia el radiador.

La ecuación de continuidad permite relacionar las velocidades, tanto de entrada como de salida.

$$A1 * V1 = A2 * V2 \quad (5.4)$$

Se considera la velocidad V1 como la velocidad media del viento sin considerar la velocidad del monoplaza en la pista.  $A1 = 0,071 \text{ m}^2$ ,  $A2 = 0,063 \text{ m}^2$  son el área de entrada y salida de ponton respectivamente

$$V_2 = \frac{A_1 * V_1}{A_2} = \frac{0,071m^2 * 12m/s}{0,063m^2}$$

$$V_2 = 13,52 m/s$$

El flujo másico del aire que atraviesa el radiador se calcula mediante la fórmula del caudal másico que se deriva del principio de Bernoulli para fluidos:

$$\dot{m} = \rho * A_2 * V_2 \quad (5.5)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire (anexo 2), se considera a una temperatura de 25°C, que es la temperatura ambiente promedio a la que se someterá el monoplaza.

$$\dot{m} = 1,184 kg/m^3 * 0,063 m^2 * 13,52m/s$$

$$\dot{m} = 1,0087 Kg/s$$

La temperatura del aire a la salida del radiador se calcula con la razón de transferencia de calor.

$$T_{salida\_aire} = \frac{\dot{Q}_{aire}}{\dot{m}_{aire} * C_{aire}} + T_{ent\_aire} \quad (5.6)$$

La fórmula 5.6 se obtiene al despejar la tasa de transferencia de calor del aire  $\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire} * C_{aire} (T_{salida} - T_{entrada})$ . En donde  $C_{aire} = 1.007 KJ/Kg.K$  es el calor específico del aire, la temperatura de entrada del aire es la temperatura ambiente de 25 ° C, de acuerdo a la tabla A-15 [5].

$$T_{salida\_aire} = \frac{6,91 KJ/s}{1,167 \frac{Kg}{s} * 1.007 \frac{KJ}{Kg * ^\circ C}} + 25^\circ C$$

$$T_{salida\_aire} = 32,34 ^\circ C$$

El caudal de aire que pasa a través del radiador se calcula en m<sup>3</sup>/s.

$$\dot{V}_{aire} = \frac{\dot{Q}_{aire}}{C_{aire} * \rho_{aire} * \Delta T_{aire}} \quad (5.7)$$

Donde  $C_{aire}$  y  $\rho_{aire}$  son el calor específico y la densidad del aire respectivamente a una temperatura de 25 °C.

$$\dot{V}_{aire} = \frac{6,91 \text{ KJ/s}}{1,007 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 32,34^\circ\text{C}}$$

$$\dot{V}_{aire} = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$$

De igual manera el caudal de refrigerante que pasa a través del radiador se calcula en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$$\dot{V}_{refrig} = \frac{\dot{Q}_{refrig}}{C_{refrig} * \rho_{refrig} * \Delta T_{refrig}} \quad (5.8)$$

Donde  $C_{refrig}$ ,  $\rho_{refrig}$  son el calor específico y la densidad del refrigerante (agua) a una temperatura de 40 °C,  $\Delta T_{refrig}$  es la variación de la temperatura del refrigerante entre la entrada y salida del radiador. El valor  $\Delta T_{refrig}$  se encuentra entre 5 y 10 °C generalmente para radiadores de uso automotriz, para este caso se utiliza el valor de 5[5].

$$\dot{V}_{refrig} = \frac{6,91 \text{ KJ/s}}{4,179 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 992,1 \text{ kg/m}^3 * 5}$$

$$\dot{V}_{refrig} = 0,000333 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V}_{refrig} = 0,33 \text{ l/s}$$

Para la refrigeración adecuada de un motor diésel, se requiere un caudal mínimo de aire de 0,04  $\text{m}^3/\text{s}$  por cada kilovatio de potencia neta del motor. Para el caso de motores pequeños el valor de caudal disminuye de manera considerable. [19]

Temperatura media del refrigerante en el radiador:

$$T_{refrig}^m = T_{refrig}^{en} - \frac{\Delta T_{refrig}}{2} \quad (5.9)$$

Se considera la temperatura de entrada del refrigerante en el radiador de 40 °C, ya que se toma en cuenta la temperatura de trabajo que se obtiene del manual del motor Emrax 228 [9], para un óptimo rendimiento.

$$T_{refrig}^m = 40 - \frac{5}{2} = 37,5 \text{ °C}$$

Temperatura media del aire que pasa a través del radiador:

$$T_{aire}^m = T_{aire}^{en} + \frac{\Delta T_{aire}}{2} \quad (5.10)$$

$$T_{aire}^m = 25 + \frac{32,34 - 25}{2}$$

$$T_{aire}^m = 28,67 \text{ °C}$$

El área necesaria de superficie de refrigeración en el radiador se calcula mediante la expresión matemática 5.11. [20]

$$A_{rad} = \frac{10^3 Q_{refrig}}{[U_{refrig}(T_{refrig}^m - T_{aire}^m)]} \quad (5.11)$$

Donde  $U_{refrig}^1$  es el coeficiente de transferencia de calor del refrigerante al cuerpo del radiador que está dado por las unidades  $W/(m^2 * °C)$ . En el coeficiente de transferencia de calor ya considera los efectos producidos por conducción, convección y radiación. Este valor se encuentra dentro del rango 400 a 850  $W/(m^2 * °C)$  de acuerdo a la tabla 11-1 [5], para el caso del cálculo se utiliza una media de 625  $W/(m^2 * K)$ .

$$A_{rad} = \frac{10^3 * 6,91 \text{ W}}{\left[625 \frac{W}{m^2 * °C} * (37,5 - 28,67)°C\right]}$$

$$A_{rad} = 1,25 \text{ m}^2$$

---

<sup>1</sup> El coeficiente de transferencia de calor se define como la intensidad total de transferencia de calor a través de un material



Área de la superficie frontal del radiador:

$$A_{frontal} = \frac{\dot{V}_{aire}}{v_{aire}} \quad (5.12)$$

Donde  $v_{aire}$  es la velocidad del viento en la parte frontal del radiador sin tomar en cuenta el movimiento del vehículo, este valor se encuentra entre 6 y 18 m/s [21], para el cálculo se utiliza el valor 6 m/s, por ser el valor más crítico.

$$A_{frontal} = \frac{0,18m^3/s}{6 m/s}$$
$$A_{frontal} = 0,030 m^2$$

La profundidad del panel del radiador en milímetros se calcula mediante la fórmula 5.13 [22]

$$l_{rad} = \frac{A_{rad}}{A_{frontal} * \varphi_{rad}} \quad (5.13)$$

Donde  $\varphi_{rad}$  es el coeficiente de capacidad volumétrica<sup>2</sup>, para radiadores modernos varía entre 0,6 a 1,8  $mm^{-1}$ , se utiliza el valor de 1,6 para el cálculo, ya que los valores altos son utilizados para radiadores pequeños. [22]

$$l_{rad} = \frac{1,25m^2}{0,03m^2 * 1,6mm^{-1}}$$
$$l_{rad} = 26,04 mm$$

## Método NTU

El valor del NTU<sup>3</sup>, se calcula mediante la fórmula 5.14. Donde  $U$  es la razón de transferencia de calor,  $A_s$  es el área superficial de transferencia de calor y  $C_{min}$  es la capacidad calorífica del fluido.

---

<sup>2</sup> El coeficiente de capacidad volumétrica es una relación que mide la capacidad de volumen máxima de un fluido en un recipiente.

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} \quad (5.14)$$

La razón de capacidad calorífica se obtiene al multiplicar el flujo másico por el calor específico del fluido.

$$C_h = \dot{m}c_p = 4.196 \frac{KJ}{kg * ^\circ C} * 0.33 \frac{kg}{s} = 1,3846 kW^\circ C$$

$$C_c = \dot{m}c_p = 1.007 \frac{KJ}{kg * ^\circ C} * 0.21 \frac{kg}{s} = 0,21147 kW^\circ C$$

Donde  $C_{min}$  es la razón de capacidad calorífica menor y  $C_{max}$  es la mayor, y no existe diferencia en sí;  $C_{min}$  pertenece al fluido caliente o al frío [5], por lo tanto, el valor de NTU, queda calculado de la siguiente manera:

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} = \frac{\left(0,650 \frac{kW}{m^2 * ^\circ C}\right) (0,39 m^2)}{\left(0,21 \frac{kg}{s} * 1.007 \frac{KJ}{kg * ^\circ C}\right)} = 1,2$$

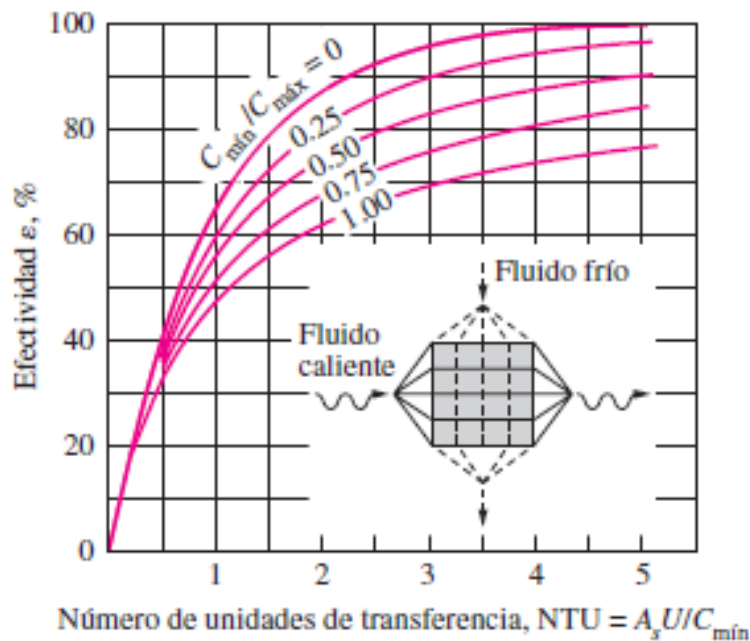
Para poder localizar la efectividad del radiador, se calcula el coeficiente c; como se muestra a continuación:

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{0,21147}{1,3846} = 0,152$$

La efectividad del intercambiador está definida por el número de transferencia, NTU; relacionando los valores antes calculados obtenemos de la gráfica una efectividad del intercambiador de un 60% aproximadamente.

---

<sup>3</sup> El valor del NTU es una medida del área superficial de transferencia de calor,  $As$ . entre mayor sea el NTU, más grande es el intercambiador de calor.



**Figura 5.5** Efectividad para los radiadores de flujo cruzado con los dos fluidos de flujo no mezclado. [5]

### Cálculos del ventilador

La velocidad circular del asa del ventilador se calcula mediante la fórmula 5.15 [22]

$$v' = \psi_a \sqrt{\frac{P_{ai}}{\rho_{ai}}} \quad (5.15)$$

Donde  $\psi_a$  es un coeficiente de generación volumétrica que depende de la forma de las aspas<sup>4</sup>:  $\psi_a = 2,2$  a  $2,9$  para aspas curvas,  $\psi_a = 2,8$  a  $3,5$  para aspas planas. Para el cálculo se toma el valor de 2.2 al requerir el sistema un ventilador con aspas curvas. En general, para los sistemas de ventilación de los motores, la presión de los ventiladores está en el rango de  $P_{ai} = 600 - 1000$  Pa., se utiliza el valor de  $800$  Pa para el cálculo que es el valor medio [22].

<sup>4</sup> El coeficiente de generación volumétrica es una relación que mide la capacidad de generar volumen de aire dependiendo de la forma de las aspas de un ventilador

$$v' = 2.2 \sqrt{\frac{800 \text{ Pa}}{1,184 \text{ kg/m}^3}}$$

$$v' = 57,19 \text{ m/s}$$

El diámetro del ventilador se calcula mediante la fórmula 5.16 [20]

$$D_v = 1,3 \sqrt{\frac{\dot{V}_{aire}}{v'}} \quad (5.16)$$

Donde  $\dot{V}_{aire}$  es el caudal del ventilador y que a su vez es el caudal de aire que pasa a través del radiador, calculado con la fórmula 5.7.

$$D_v = 1,3 \sqrt{\frac{0,18 \text{ m}^3/\text{s}}{57,19 \text{ m/s}}}$$

$$D_v = 0,073 \text{ m}$$

### Cálculos de la bomba

La caída de presión está relacionada de manera directa con la potencia necesaria para que la bomba mantenga el flujo.

Primero se calcula el número de Reynolds para saber si el flujo es laminar o turbulento, para ello se emplea la ecuación de Reynolds. [23]

$$Re = \frac{V_{prom} * D}{\nu} \quad (5.17)$$

Donde  $V_{prom}$  es la velocidad promedio del líquido refrigerante en la tubería,  $\nu$  es la viscosidad cinemática de agua, en este caso es el líquido refrigerante y D es el diámetro de la tubería.

La viscosidad cinemática a una temperatura de 37,5 °C es de  $0,6935 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ , valor que se obtiene mediante interpolación de la tabla de propiedades físicas del agua.

$$Re = \frac{V_{prom} * D}{\nu} = \frac{\left( \frac{0,0002 \frac{m^3}{s}}{\pi * (0.04m)^2} \right) * (0.08 m)}{0,6935 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 4589.90$$

Según lo obtenido con base en el número de Reynolds  $\geq 4000$ , tenemos un flujo turbulento. La rugosidad relativa de la tubería se determina por medio de la tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Valores de rugosidad para tuberías comerciales nuevas. [23]

RUGOSIDAD $\varepsilon$		
material	Ft	Mm
Vidrio, plástico	0(liso)	0(liso)
Concreto	0,003-0,03	0,9-9
Duela de madera	0,0016	0,5
Hule, alisado	0,000033	0,01
Tubería de cobre o latón	0,000005	0,0015
Hierro fundido	0,00085	0,26
Hierro galvanizado	0,0005	0,15
Hierro forjado	0,00015	0,046
Acero inoxidable	0,000007	0,002
Acero comercial	0,00015	0,045
La incertidumbre de estos valores puede ser $\pm 60$ por ciento.		

La rugosidad relativa de la cañería se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\varepsilon}{D} \tag{5.18}$$

Donde  $\varepsilon$  es la rugosidad que depende del material y “D” es el diámetro de la cañería.

Tomando los valores de la rugosidad para la cañería de hule, tomados de la tabla de rugosidad.

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.01}{0.08} = 0,125$$

El factor de fricción correspondiente a esta rugosidad relativa y numero de Reynolds se pueden determinar a partir de la ecuación de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2.51}{Re(\sqrt{f})} \right) \quad (5.19)$$

Se sustituye el valor de la rugosidad relativa y el número de Reynolds para obtener el valor del factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{0,125}{3,7} + \frac{2.51}{4590(\sqrt{f})} \right)$$

$$f = 0.02314352367$$

Una vez obtenido este valor, se procede a calcular la perdida de presión, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P = f \left( \frac{L\rho V^2}{2D} \right) \quad (5.20)$$

Donde L es la longitud de la cañería,  $V_{fluido}$  la velocidad del fluido,  $\rho$  la densidad del líquido,  $f$  es el factor de fricción y D, el diámetro de la tubería.

$$\Delta P = f \left( \frac{L \rho V_{fluido}^2}{2D} \right) = 0,00231 \left( \frac{\left( \left( 992,1 \frac{kg}{m^3} \right) \left( 0,0397 \frac{m}{s} \right)^2 * (1m) \right)}{2(0,08m)} \right)$$

$$= 9,77 \frac{Kg}{ms^2}$$

La pérdida de carga  $h_L$ <sup>5</sup>, se calcula mediante la siguiente expresión matemática [23]:

$$h_L = f \left( \frac{LV^2}{2g} \right) \quad (5.21)$$

El valor de la gravedad es de  $9,81m/s^2$ .

$$h_L = f \left( \frac{LV_{fluido}^2}{2g} \right) = 0,00231 \left( \frac{(1m) \left( \frac{0,0397m}{s} \right)^2}{2 \left( 9,81 \frac{m}{s^2} \right) (0,08m)} \right) = 1,00413mm$$

La potencia de bombeo requerida para la perdida de carga anterior se pasa a calcular mediante la siguiente expresión:

$$\dot{W} = \dot{V} \Delta P \quad (5.22)$$

Donde  $\dot{W}$  es la potencia de bombeo,  $\dot{V}_{tub}$  es el caudal en la tubería, y  $\Delta P$  es la variación de la presión.

$$\dot{W} = \dot{V}_{tub} \Delta P = \left( \left( 0,0002 \frac{m^3}{s} \right) * \left( 9,77 \frac{Kg}{m s^2} \right) \right) = 1,954x10^{-3} W$$

A continuación, se observa la tabla 5.2 donde se resumen los datos más relevantes del cálculo, los que se debe tener en cuenta para seleccionar los elementos del sistema de refrigeración.

---

<sup>5</sup> La pérdida de carga  $h_L$  representa la altura adicional que el fluido necesita elevarse por medio de una bomba, con la finalidad de superar las perdidas por fricción en la tubería.

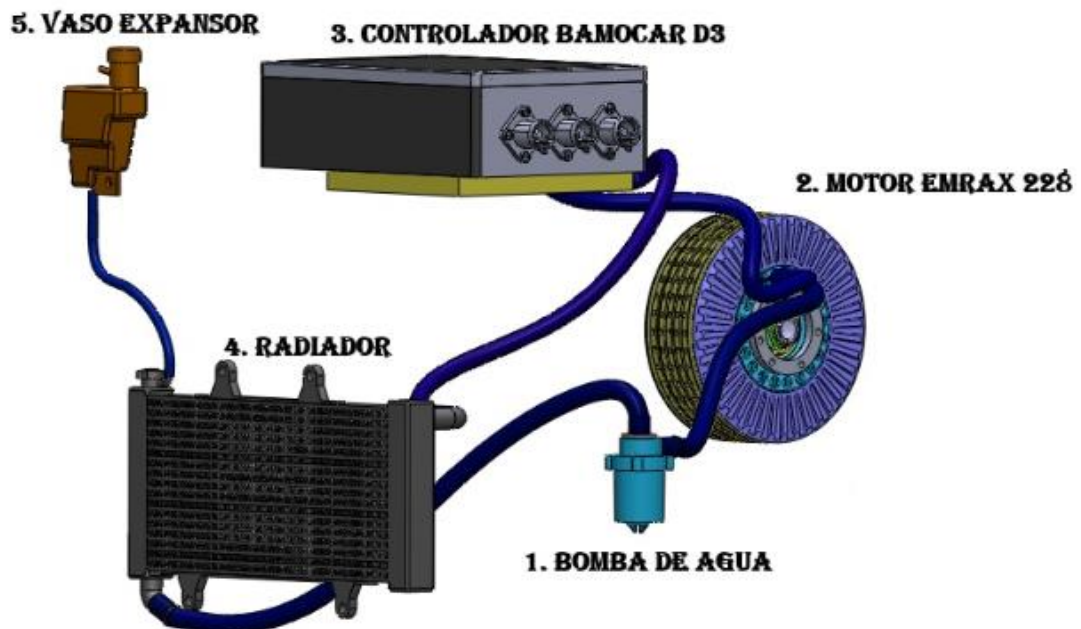
**Tabla 5.2** Valores calculados para los elementos del sistema de refrigeración.

Parámetro	Valor
Potencia a disipar	6,91 KW
Área frontal del radiador	0,030 m <sup>2</sup>
Diámetro del ventilador	0,073 m
Potencia de bombeo	1,954x10 <sup>-3</sup> W

### 5.2.5.2 Descripción del sistema de refrigeración

El sistema consta de cuatro elementos en total, en primera instancia la bomba genera el caudal hacia el motor, seguido del controlador y por último hacia el radiador, repitiéndose constantemente el ciclo al estar conectada la salida del radiador a la entrada de la bomba de agua.

El motor es el primer elemento a ser refrigerado debido a que genera mayor calor y por lo tanto se requiere de una menor temperatura a la entrada (véase fig. 5.6).

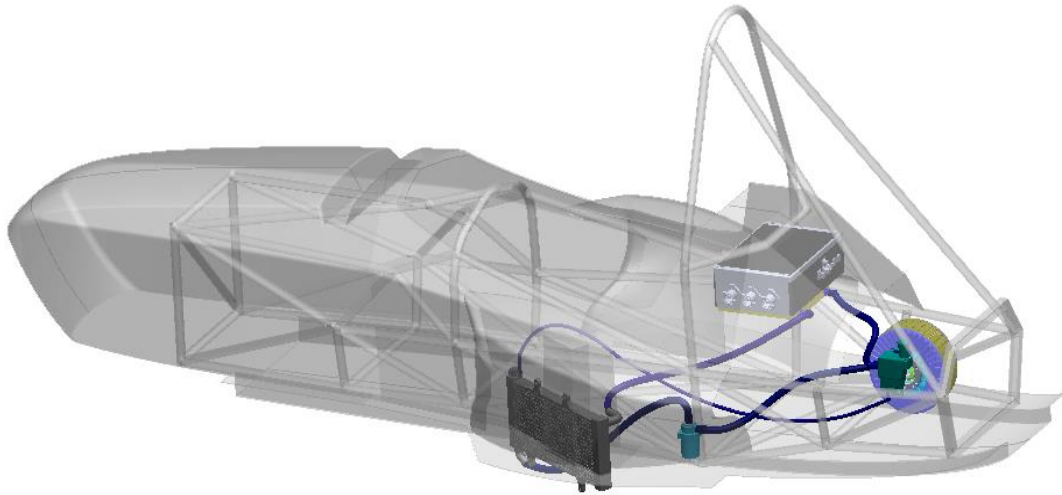


**Figura 5.6** Descripción del sistema de refrigeración.



### 5.2.5.3 Ubicación de los componentes del sistema

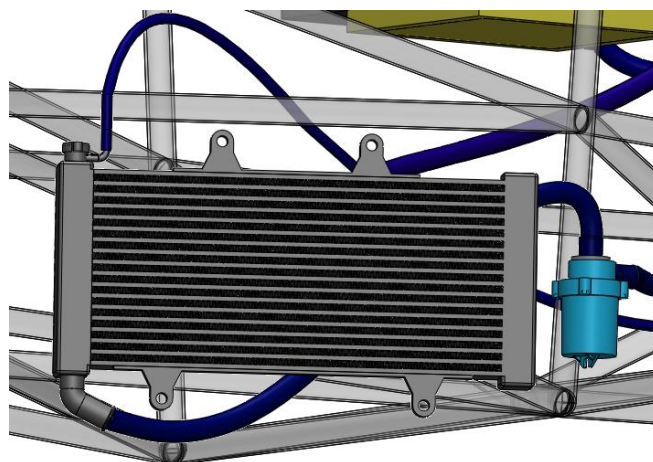
Los elementos del sistema de refrigeración van ubicados de acuerdo a la geometría y a la disposición del vehículo (véase fig.5.7).



*Figura 5.7 Elementos del sistema de refrigeración.*

#### Ubicación del radiador

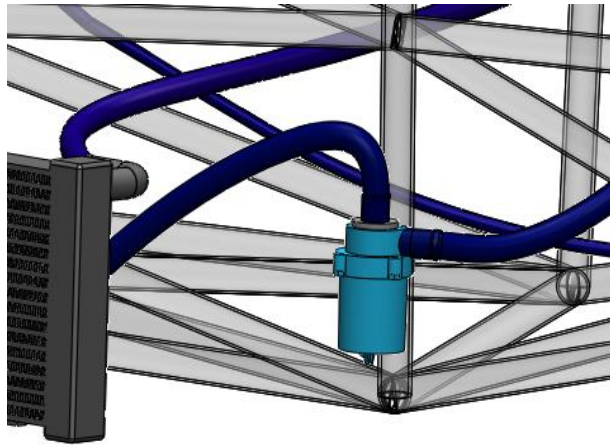
El radiador va ubicado en la parte izquierda del FSAE, a 20 cm de la entrada del pontón, el mismo tiene una inclinación de 30 grados con respecto al plano longitudinal del vehículo, el radiador adopta esta posición debido a la geometría de la carrocería, ya que el espacio disponible no permite colocar el radiador totalmente perpendicular.



*Figura 5.8 Ubicación del radiador.*

### Ubicación de la bomba

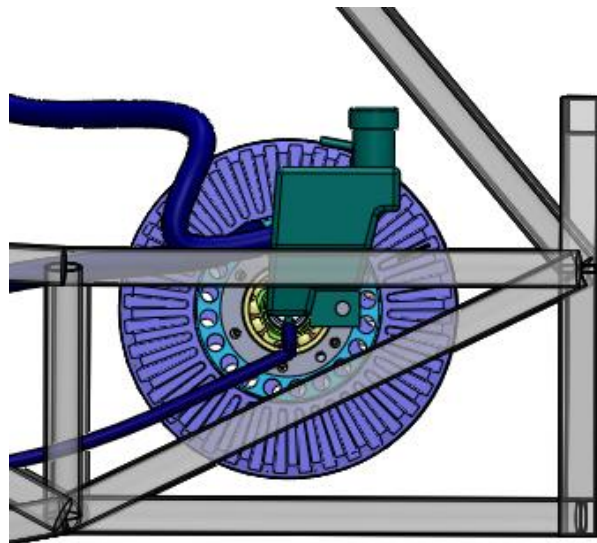
La bomba va ubicada en la parte más baja posible, debido a que la entrada de agua en la bomba se encuentra en la parte superior, con esto se consigue una mejor circulación del refrigerante en el sistema.



*Figura 5.9 Ubicación de la bomba.*

### Ubicación del vaso expansor o depósito de agua

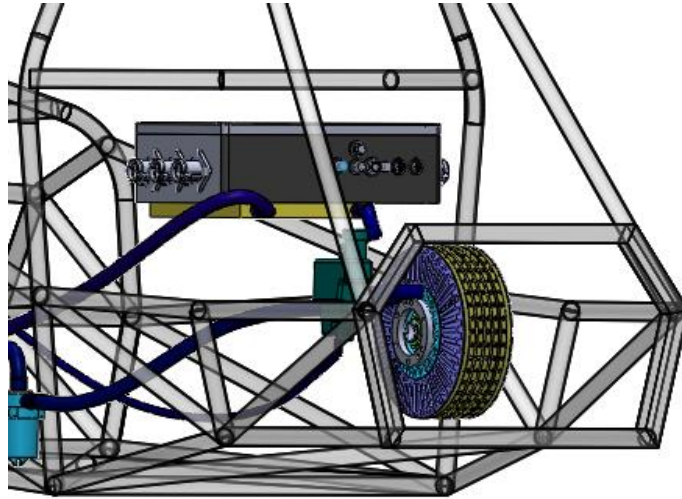
El vaso expansor va ubicado lo más distante posible de la zona de alto voltaje que genera la batería, por lo tanto, se ubica en la parte trasera junto a la transmisión y va fijada al chasis como los demás elementos.



*Figura 5.10 Ubicación del vaso expansor.*

## Ubicación del motor y controlador

Los dos elementos a refrigerar ya tienen ubicación establecida de acuerdo al trabajo que van a realizar (fig. 5.11).



*Figura 5.11 Ubicación del motor y controlador.*

### 5.2.5.4 Requerimientos para la instalación del sistema de refrigeración

La tabla 5.3 indica los diámetros de las entradas y las salidas de los elementos a ser refrigerados.

*Tabla 5.3 Diámetros de las entradas y salidas de los elementos*

Elementos del sistema de refrigeración	Diámetro de entrada (pulgadas)	Diámetro de salida (pulgadas)
Motor	3/8	3/8
Controlador	1/2	1/2
Bomba	3/4	3/4
Radiador	5/8	5/8

## Instalación de las mangueras de refrigeración

Para la instalación de las mangueras de refrigeración, se requiere de acoples reductores debido a que los diámetros de las entradas y salidas de los componentes no son los mismos. Los acoples se describen en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4** Diámetros de los reductores

Elementos	Diámetro de los acoples reductores	Figura
Bomba-motor	3/4 a 3/8	
Motor-controlador	3/8 a 1/2	
Controlador-radiador	1/2 a 5/8	
Radiador-bomba	5/8 a 3/4	

## Control de funcionamiento del electroventilador

Para el accionamiento del ventilador existen dos posibilidades que se las proponen a continuación:

### Accionamiento controlado

Para este tipo de accionamiento se requiere de un sistema eléctrico, que permita la activación del ventilador cuando la temperatura del refrigerante alcanza los 40°C. Se

toma este valor debido a que el controlador, no debe trabajar por encima de los 45°C ya que pierde eficiencia (ver tabla 4.2). Se requiere de un termoswitch que permita cerrar el circuito a la temperatura antes mencionada, logrando con esto la energización del electroventilador y a su vez apagarlo cuando la temperatura sea inferior.

Debido a que la disposición de un termoswitch cuya temperatura de conmutación sea 40°C es escasa en el mercado, se tiene otra opción, que es adaptar un circuito electrónico mediante un sensor de temperatura automotriz conjuntamente con una tarjeta electrónica (arduino). Con esto se pretende captar la temperatura del refrigerante y enviar la señal eléctrica a la tarjeta electrónica, la misma que debe estar programada para cerrar el circuito, activando el electro ventilador a la temperatura indicada.

### **Accionamiento directo**

Este método es sencillo pues únicamente se conecta el electroventilador directamente a 12 Voltios. Con esto se garantiza que el flujo de aire hacia el radiador este siempre presente, manteniendo los componentes más fríos, ya que el motor y controlador requieren estar fríos para ser más eficientes.

La desventaja de este sistema es el consumo energético constante desde el momento que se acciona el circuito de bajo voltaje.

### **5.2.6 Selección de elementos para el sistema de refrigeración**

Los elementos necesarios para la construcción del sistema de refrigeración, son seleccionados mediante una matriz de selección, donde para valorarlos se toma en cuenta la siguiente numeración:

Bajo: (1-3)




Medio: (4-6)

Alto :(7-10)

## Elección del intercambiador de calor

A continuación, en la tabla 5.5, se observa la matriz de selección para el intercambiador de calor.

*Tabla 5.5 Matriz de selección intercambiador de calor*

Radiador		Capacidad	Disponibilidad	Confiabilidad	Costo (\$)	Total
<b>Moto.</b>	Factor de Ponderación	0.4	0.2	0.2	0.1	
<b>Piaggio nrg</b>		1	3	1	6	1.8
		0.4	0.6	0.2	0.6	
<b>Pit bike</b>		3	3	3	5	2.9
		1.2	0.6	0.6	0.5	
<b>Duke 390</b>		9	8	7	2	6.8
		3.6	1.6	1.4	0.2	

El radiador seleccionado para el sistema de refrigeración del FSAE eléctrico es el radiador de la moto Duke 390.



*Figura 5.12 Radiador Duke 390.*

Basados en la potencia de la moto Duke 390 (Anexo 1) [24] y mediante el diagrama de Sankey para motores de combustión a gasolina, podemos decir que el 33% de la potencia del motor (32 kW) se pierde en refrigeración, es decir 10,56 kW son disipados en calor.

El calor generado teóricamente por el conjunto motor - controlador y expresados anteriormente mediante cálculos matemáticos es de 6.9 kW, menor que 10.56 kW de la moto Duke 390.



*Figura 5.13 Diagrama de Sankey [25]*

A continuación, se detallan las características del intercambiador de calor de la moto KTM Duke 390.



*Tabla 5.6 Características del radiador.*

Características del radiador de la moto Duke 390	
Número de tubos	19
Largo	0,248 m
Alto	0,157 m
Área frontal	0,39 m <sup>2</sup>

## Selección de la bomba de agua

Se observa en la tabla 5.7 la matriz de selección para la bomba de agua eléctrica.

*Tabla 5.7 Matriz de selección bomba de agua.*

Marca		Disponibilida d	Caudal	Confiabili dad	Cost o	Total
	<b>Factor Ponderación</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.1</b>	
<b>Bosch</b>		8	8	8	7	7.9
		2.4	2.4	2.4	0.7	
<b>EBP</b>		3	8	5	6	5.4
		0.9	2.4	1.5	0.6	

Se selecciona la bomba Bosch debido a su confiabilidad para el trabajo; esta bomba es usada como bomba auxiliar de varios vehículos dentro de estas marcas conocidas tales como: Audi, Mercedes Benz, VW.

Con un consumo de 1.3 Amperios, 12 V y con un caudal de 1200 l/hr. Esta bomba de agua eléctrica Bosch, es una bomba rotativa de circulación de agua, posee un motor DC, con un acoplamiento accionado por un solenoide. La bomba es un solo componente y es a prueba de fugas.

El funcionamiento de esta bomba no es regenerativo, la bomba es diseñada únicamente para bombeo de agua. [26]



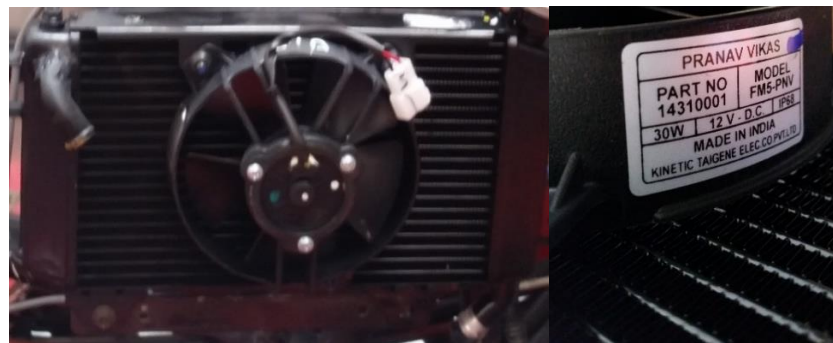


*Figura 5.14 Bomba de agua eléctrica Bosch [26]*

### **Elección del Ventilador**

Este elemento viene incorporado al radiador antes seleccionado, tiene una potencia de 30 Watts y el voltaje de funcionamiento es de 12V. El consumo de corriente es de 2.5 Amperios.

El ventilador cuenta con una protección IP 68, lo que significa que cuenta con una protección completa contra sedimentaciones de polvos en el interior y contra penetraciones de agua.



(a)

(b)

*Figura 5.15 Ventilador-(a) vista frontal – (b) características.*

## Lista de materiales y componentes a utilizar

Una vez seleccionados los elementos para el sistema de refrigeración se proceden a detallar cada uno de ellos en la tabla 5.8.

*Tabla 5.8 Elementos del sistema de refrigeración.*

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Marca / Código Fabricante</b>
<b>Intercambiador de calor</b>	1	Ktm Ktm/Duke/390/2014
<b>Ventilador</b>	1	Ktm Ktm/Duke/390/2014
<b>Bomba de agua eléctrica</b>	1	Bosch 0 392 022 002 PCA 12V
<b>Vaso expansor</b>	1	Ktm Ktm/Duke/390/2014

### 5.2.7 Producción del prototipo y pruebas

#### 5.2.7.1 Banco de pruebas

Se construye un banco de pruebas para el sistema de refrigeración debido a que el vehículo y el tren de potencia eléctrico aún se encontraban en desarrollo durante el progreso de este proyecto técnico.

Se colocaron los elementos en el banco para que a futuro se puedan realizar las pruebas de funcionamiento, en la figura 5.16 se puede visualizar los elementos y la configuración del sistema de refrigeración, para ser sometidos a los distintos ensayos una vez concluidos los demás sistemas.



*Figura 5.16 Banco de pruebas.*

### **5.2.7.2 Disposición de los elementos en el prototipo FSAE**

Para visualizar la disposición de los elementos involucrados en el sistema de refrigeración del vehículo FSAE eléctrico, en primera instancia con las medidas de los componentes y determinada la ubicación de cada fragmento.

Se procede con la construcción de una maqueta a escala 1:1, de cada uno de los sistemas, partes y piezas que conforman el monoplaza, que tendrá su participación en el año 2017, cada una de estas partes es elaborada con materiales reciclables, tales como: cartón, madera, mangueras.

Con la colaboración y aporte de cada miembro del equipo FSAE UPS se pudo lograr construir y obtener lo que se convierte en un modelo no funcional del prototipo (figura 5.17).



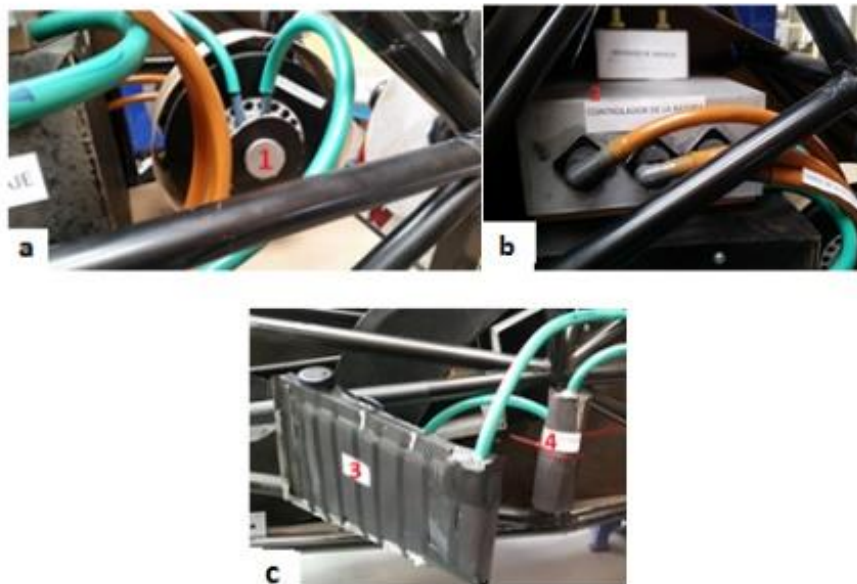
*Figura 5.17 Prototipo FSAE y sistemas auxiliares.*

La disposición del radiador, la bomba, el motor y controlador se encuentran detallados a continuación:

En la figura 5.18 (a) se puede visualizar al motor Emrax 228 MV que está realizado en madera con las dimensiones originales, con sus entradas de líquido refrigerante.

En la figura 5.18 (b) el controlador Bamocar D3 realizado en escala 1:1 con sus entradas eléctricas y de líquido refrigerante.

Finalmente, en la figura 5.18 (c) se puede apreciar el radiador y la bomba realizados con materiales reciclables.



**Figura 5.18** Elementos del sistema de refrigeración; (a) Motor Emrax 228 MV (b) Controlador Bamocar D3 (c) Radiador-Bomba de agua.

### Pruebas preliminares

### Pruebas en el intercambiador de calor

Para determinar la eficiencia del conjunto radiador ventilador, se lo coloca en el vehículo FSAE Gasolina, el mismo que puede ser observado en la figura 5.19 y se procede a determinar la capacidad del conjunto para disminuir la temperatura alcanzada por el refrigerante, esta prueba se realiza debido a que el conjunto

impulsor y tren motriz del monoplaza eléctrico aún estaba en desarrollo durante la elaboración de este proyecto técnico.

El vehículo Fsaec con motor a gasolina tuvo su participación en la competencia de formula student en Bridgeston-Inglaterra en el año 2014. Este monoplaza cuenta con un par motor de 26.5 Kw, obtenidos en un banco dinamométrico.

La potencia original del motor Yamaha FZR600 es de 56.6 kW, es decir esta diferencia de potencia de 29,9 kW, se pierden debido al accionamiento de los sistemas auxiliares, en el que está incluido el calor disipado por el sistema de refrigeración.



*Figura 5.19 FSAE con motor de combustión.*

### **Consideraciones y trabajos realizados antes de las pruebas.**

Sustitución del radiador del vehículo FSAE gasolina por el radiador seleccionado para el FSAE eléctrico.



*Figura 5.20 Intercambiador de calor FSAE con motor de combustión.*

Se procede a retirar el radiador que se encuentra montado en el vehículo FSAE gasolina, para colocar el radiador que será utilizado en el vehículo FSAE Eléctrico.



*Figura 5.21 Intercambiador de calor FSAE Eléctrico.*

Una vez colocado el radiador en su posición de trabajo se procede con la toma de datos, con el vehículo en estado estacionario. El ensayo se realiza para poder visualizar la disminución de temperatura a través del elemento disipador de calor, conforme avanza el tiempo el monoplaza alcanza su temperatura de trabajo, permitiendo así obtener imágenes claras del trabajo que efectúa el intercambiador de calor.

Los materiales ya algunas consideraciones antes de realizar las pruebas son detalladas en la tabla 5.9

*Tabla 5.9 Materiales y consideraciones para la realización de las pruebas.*

<b>Materiales e Instrumentos</b>	<b>Consideraciones</b>
<b>Pirómetro</b>	El líquido refrigerante es agua.
<b>Termocupla</b>	Encendido del ventilador 65°C
<b>Multímetro</b>	Temperatura ambiente 22°C.
<b>Cámara termografía.</b>	

### **Prueba estática**

Para la toma de muestras, se utiliza un pirómetro para la medición de temperatura. Localizando un punto en la parte exterior del radiador, considerando que la temperatura del agua en comparación con la temperatura externa del radiador tiene una diferencia del 7%. Para esta comparación se hace uso de una termocupla, la que permite medir la temperatura del agua.



*Figura 5.22 Puntos referenciales para la toma de datos. 1. Entrada del líquido refrigerante. 2- salida del líquido refrigerante.*

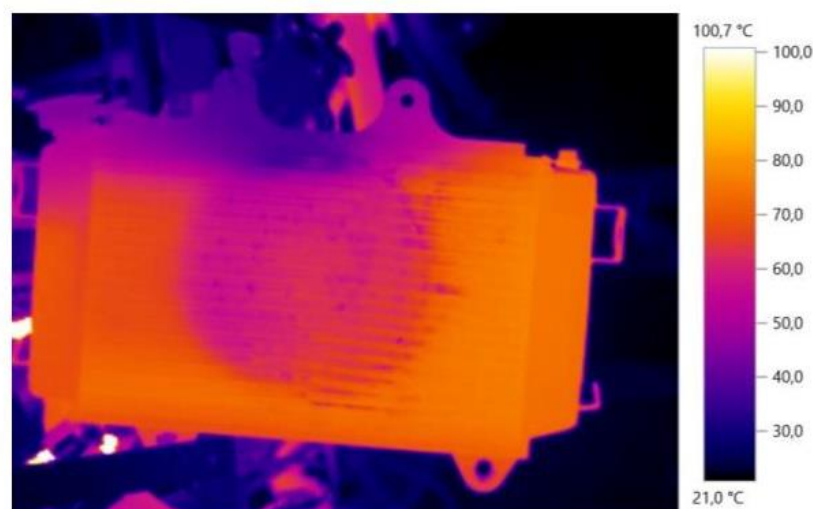
Los puntos de toma de muestras están denominados con los números 1 y 2 correspondientes a la entrada y salida del líquido refrigerante, para que la prueba sea válida, las temperaturas registradas a lo largo de la misma deben ser tomadas en los mismos puntos.

Mediante el software Haltech se reprograma la ECU del FSAE con motor de combustión, para que el electro ventilador se encienda a los 65°C, al ser un motor de combustión tiene que alcanzar su temperatura optima de funcionamiento que esta por los 90 °C, la finalidad de esta prueba es comprobar que el conjunto radiador-ventilador cumplan su misión, la que consiste en lograr el descenso de más de 5 °C en la temperatura del refrigerante, la que se planteó en la realización del cálculo del intercambiador de calor.

Esta prueba se la realiza a un régimen de ralentí, ya que se pretende observar todo el comportamiento del sistema de refrigeración hasta lograr la temperatura de trabajo, no se realiza el ensayo a un régimen mayor debido a que esto provoca la elevación de la temperatura del motor en un menor tiempo y no se puede apreciar de manera ideal el trabajo del conjunto radiador - ventilador.

Para corroborar los datos obtenidos en las pruebas, se toman fotos superficiales del conjunto, mediante una cámara termográfica, la misma que permite visualizar el comportamiento de la temperatura en el radiador.

En la figura 5.23 se observar la temperatura del refrigerante, desde la entrada hacia la salida del radiador.



*Figura 5.23 Temperatura superficial del radiador.*

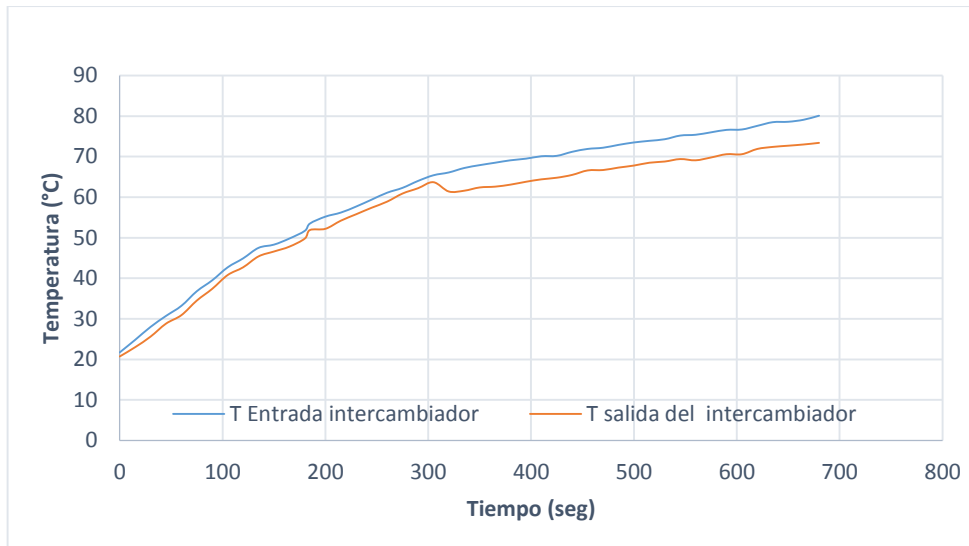


En la tabla 5.10 se observan los datos obtenidos, del comportamiento de la temperatura a través del radiador en función del tiempo, en el cual el motor alcanza su temperatura ideal del trabajo. Véase todos los datos obtenidos en el anexo 4.

*Tabla 5.10 Datos obtenidos de las pruebas.*

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>T entrada del radiador (°C)</b>	<b>T salida del radiador (°C)</b>
330	66.1	61.4
345	67.2	61.6
360	67.9	62.4
375	68.5	62.6
390	69.1	63.1
405	69.5	63.8
420	70.1	64.4
435	70.2	64.8
450	71.2	65.5
465	71.9	66.6
480	72.2	66.7
495	72.9	67.3
510	73.5	67.8
525	73.9	68.5
540	74.3	68.8
555	75.2	69.4
570	75.4	69.1
585	76	69.8
600	76.6	70.6
615	76.7	70.6
630	77.6	71.9
645	78.5	72.4
660	78.6	72.7
675	79.1	73
690	80.1	73.4

Como se observa en los datos obtenidos y en la figura 5.24, efectivamente el conjunto cumple su función, logrando un descenso de temperatura de 5°C a 6.7°C, una vez encendido el electro ventilador.



**Figura 5.24** Firma térmica conjunto intercambiador de calor.

A continuación, se observan las imágenes obtenidas con una cámara termografía para corroborar los datos.

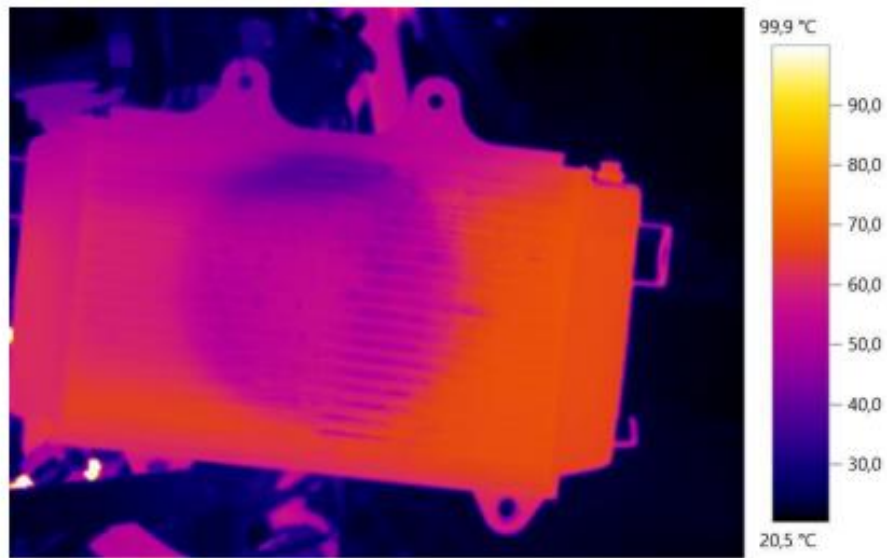
En la figura 5.25 se visualiza lo obtenido con la cámara termográfica a los 15 segundos de encendido el monoplaza, la temperatura promedio es de unos 23°C, por obvias razones el vehículo está frío.



**Figura 5.25** Temperatura superficial.

La temperatura a medida que transcurre el tiempo aumenta, hasta alcanzar la temperatura de trabajo del motor, el ventilador se enciende a los 65°C, como se observa en la figura 5.26.

La temperatura a la entrada del radiador es de 66.1 °C, la temperatura media es de 55.6°C y la temperatura de salida del radiador 61.4°C. La diferencia de temperaturas tan pronto como se enciende el ventilador es de 4.7°C.



***Figura 5.26*** Temperatura superficial - Ventilador encendido.

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizada la metodología planteada y las distintas pruebas se obtiene los siguientes resultados:

### 6.1 Parámetros más relevantes para la selección de los distintos componentes del sistema.

Se concluye que la mejor opción es construir un solo sistema de refrigeración, obteniendo con esto una reducción significativa en cuanto a costo de materiales y menor espacio utilizado.

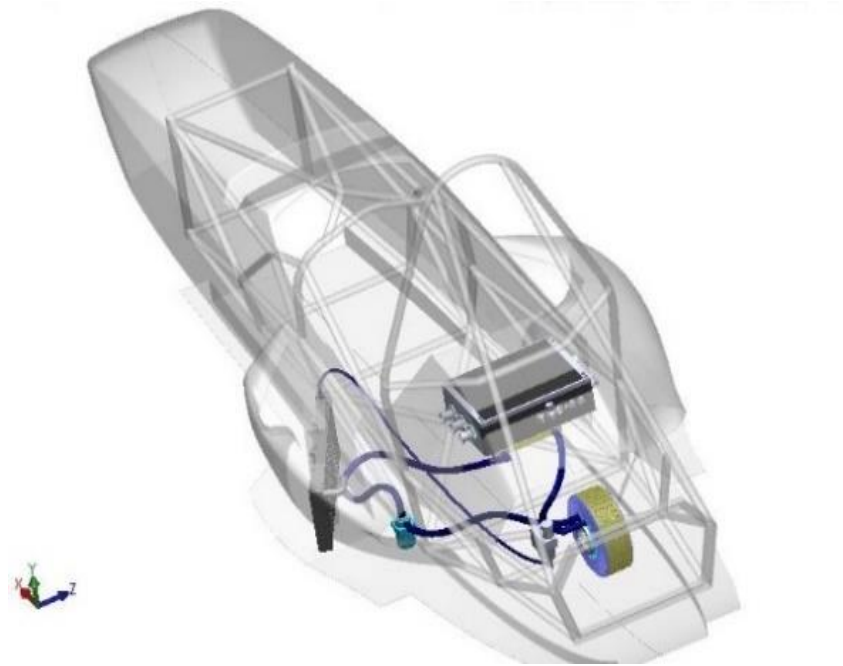
Mediante la investigación, realización de los cálculos, basados en modelos matemáticos y fórmulas antes descritas, se llegó a obtener los parámetros más relevantes para la selección de los distintos componentes del sistema de refrigeración. Se observan a continuación en la tabla 6.1 los valores más relevantes del cálculo.

*Tabla 6.1 Parámetros para la selección de los elementos del sistema de refrigeración.*

Parámetro	Valor
Potencia a disipar	6,91 KW
Área frontal del radiador	0,030 m <sup>2</sup>
Diámetro del ventilador	0,073 m
Potencia de bombeo	1,954x10 <sup>-3</sup> W

### 6.2 Disposición de los elementos en el vehículo FSAE eléctrico.

La disposición y configuración del sistema de refrigeración se visualiza en la figura 6.1, se aprovecha el espacio disponible en el pontón izquierdo para la ubicación del intercambiador de calor. Con esta disposición se logra reducir la longitud de las mangueras por la cercanía de los elementos a ser refrigerados.



*Figura 6.1 Ubicación de los elementos del sistema de refrigeración.*

### **6.3 Lista de materiales y costos para la construcción del sistema de refrigeración.**

Mediante los cálculos se logran establecer las características de los componentes del sistema de refrigeración, tales como: radiador, ventilador y bomba de agua. Los elementos seleccionados tienen características técnicas, cuyos valores son mayores a los calculados, debido a cuestiones de seguridad y disposición de los mismos en el mercado.

**Tabla 6.2** Materiales y costos.

Elemento	Cantidad	Marca	Código	Características	Costo (\$)
<b>Intercambiador de calor</b>	1	Ktm	KTM/390/201 4	1/2 Litro- Capacidad 30x16x3.4 cm	339.81
<b>Electroventilador</b>	1	Ktm	KTM/390/201 4 Incluye precio/ radiador	30 watts 12v	0.00
<b>Bomba de agua eléctrica</b>	1	Bosch	0 392 022 002 PCA 12V	1 kg peso 20Lpm	63.56
<b>Vaso Expansor</b>	1	Ktm	KTM/390/201 4	¼ litro- capacidad	33.00
<b>Mangueras</b>	3 m	GST II	5/8 ID(16mm)	5/8 ID(16mm) 200 psi	20.00
<b>Abrazaderas metálicas</b>	14	Breeze/ USA	1294962	17-32 mm 8-16 mm	10.50
<b>Acoples / reductores</b>	4	Plastiga ma	-	ASTM-D2609 ¾-3/8 pulgada 3/8-1/2 pulgada ½-5/8 pulgada 5/8-3/4 pulgada	6,00
<b>Arnés eléctrico bomba</b>	1	Bosch	-	12 v	6,50
<b>Arnés eléctrico electroventilador</b>	1	-	-	12 v	2.00
<b>Total</b>					<b>481.37</b>

#### 6.4 Banco de pruebas

El banco de pruebas se lo construyó en el laboratorio de aplicación de materiales de la Universidad Politécnica Salesiana; este banco servirá para realizar las pruebas una vez armado el sistema de tren motriz del vehículo FSAE eléctrico.



*Figura 6.2 Banco de pruebas- sistemas de refrigeración- motor -controlador.*

El sistema de refrigeración tiene su configuración en el siguiente orden: Bomba de agua -Motor Emrax 228 MV – Controlador Bamocar D3 – Radiador, a su vez el radiador tiene conexión hacia el vaso expensor mediante otro conducto.

La configuración antes indicada se realiza debido a que el motor genera mayor calor; por lo tanto, requiere de menor temperatura del refrigerante a la entrada, como se pretende mantener el sistema en un máximo de 40 °C, el controlador no se vería afectado en su funcionamiento.

Mediante las pruebas realizadas con la cámara termográfica se puede comprobar que la variación de temperatura entre la entrada y salida del radiador es de 5 a 6,7 °C. Por lo tanto el valor estimado que se utilizó en el cálculo de 5 °C es válido.

## 7 CONCLUSIONES

Al final del presente proyecto técnico se concluye:

El objetivo principal del proyecto es el diseño y construcción del sistema de refrigeración. Este se cumple por medio de la metodología de diseño adaptada a las necesidades requeridas, por lo tanto, se garantiza un diseño que cumplirá las exigencias planteadas.

Se seleccionaron los elementos del sistema de refrigeración debido a sus características semejantes a las obtenidas en los cálculos realizados y al estar los mismos involucrados directamente en el área automotriz, garantizando su fiabilidad, su funcionamiento y eficiencia para el trabajo requerido.

El radiador adaptado al sistema es capaz de disipar un porcentaje mayor de calor, respecto al valor obtenido en los cálculos, esto se lo justifica debido a las pérdidas que en el sistema se irán dando durante el funcionamiento del vehículo.

El sistema de refrigeración tiene un consumo relativamente bajo de energía, ya que el sistema requiere para su correcto funcionamiento un consumo de corriente de aproximadamente 4 amperios.

Se obtiene una configuración adecuada, en la cual se detalla en donde deben ir ubicados los componentes del sistema de refrigeración, logrando optimizar los espacios muertos que presenta el diseño del monoplaza. El radiador va ubicado en la parte izquierda compensando el peso del sistema de bajo voltaje que va ubicado en el lado opuesto. Con esto se pretende lograr una buena distribución de pesos en todo el vehículo.

El diseño se adapta el reglamento de la formula Fórmula SAE, teniendo en cuenta las disposiciones y características de cada punto en el reglamento. Es el caso del vaso expensor, el cual está ubicado detrás de la pared corta fuegos y por debajo del hombro del conductor, tal y como lo dice el punto **T8.2.5.**, garantizando además que este elemento soportará las temperaturas de trabajo sin presentar riesgo para el piloto.



## **8 RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar pruebas en el sistema de refrigeración una vez culminado el FSAE eléctrico. Para garantizar la confiabilidad, el rendimiento y solucionar posibles fallas que se puedan presentar antes de la competencia.

En el proceso de armado del sistema de refrigeración se recomienda tener minucioso cuidado de que los componentes se encuentren lejos de cables de alto voltaje, por cuestiones de seguridad para el piloto.

Para el mantenimiento del sistema de refrigeración, verificar el nivel de agua, estado de los conductos, estado de la tapa del radiador, estado de las abrazaderas de sujeción de los conductos, accionamiento de la bomba y funcionamiento del electro ventilador.

### **Recomendaciones de proyectos a futuro:**

Se recomienda determinar la firma térmica del sistema de refrigeración con el motor eléctrico y controlador ya incorporado y comparar el comportamiento frente a un motor de combustión interna.

Se debe tomar en cuenta el diseño del sistema de refrigeración y demás sistemas antes de proceder al diseño de la carrocería del FSAE, para evitar posibles modificaciones en sistemas o partes ya establecidas o diseñadas.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] S. Internacional, «SAE, internacional,» [En línea]. Available: <http://students.sae.org/>. [Último acceso: 01 06 2016].
- [2] K. F. STUDENT, «kht,» [En línea]. Available: <http://www.kthformulastudent.se/>.
- [3] F. SAE, «<http://www.fsaeonline.com/>,» [En línea]. Available: [http://www.fsaeonline.com/content/2016\\_FSAE\\_Rules.pdf](http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf). [Último acceso: 08 06 2016].
- [4] I. C. E. U. Cristián Guevara Vicuña, «Reducción de perdidas en motores,» *Electro Industria*, 2008.
- [5] Y. A. CENGEL, Transferencia de calor y masa, Tercera Edicion, 2007.
- [6] F. CLASICOS, «FIERRROS CLASICOS.COM,» 7 NOVIEMBRE 2012. [En línea]. Available: <http://www.fierrosclasicos.com/>. [Último acceso: 17 JUNIO 2016].
- [7] E. R. E. Cubana, «ECU RED conocimiento con todos y para todos,» [En línea]. Available: <http://www.ecured.cu/>. [Último acceso: 17 Junio 2016].
- [8] D. CRAIG, «DAVIES CRAIG PTY. LMT.,» FOX DIGITAL WEB , [En línea]. Available: <http://daviescraig.com.au/>. [Último acceso: 17 JUNIO 2016].
- [9] F. SAE Electric, «[www.enstroj.si](http://www.enstroj.si/),» [En línea]. Available: <http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-motorsgenerators.html>. [Último acceso: 02 05 2016].
- [10] F. Electric, «[www.unitek-online.de](http://www.unitek-online.de/),» [En línea]. Available: <http://www.unitek-online.de/pdf/download/Antriebe-Drive/BAMOCAR/E-BAMOCAR-D3.pdf>.
- [11] F. S. G. I. D. Competition, «Formula Student Germany,» [En línea]. Available: [www.formulastudent.de](http://www.formulastudent.de).
- [12] S. Internacional, «2015 FORMULA SAE ELECTRIC LINCOLN,» [En línea]. Available: [students.sae.org](http://students.sae.org/). [Último acceso: 04 05 2016].
- [13] J. LaMarre, *FSAE Electric Vehicle Cooling System Design*, ohio, 2015.
- [14] E. Motorsport, «ETSEIB Motorsport,» [En línea]. Available: <http://www.etseib-motorsport.upc.edu/>.
- [15] A. RACING, «FS Total,» 4 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://www.fstotal.com/>. [Último acceso: 16 06 2016].
- [16] G. T. STUTTGART, «GREEN TEAM UNI STUTTGART,» [En línea]. Available: <http://www.greenteam-stuttgart.de/>. [Último acceso: 16 Junio 2016].
- [17] C. A. R. Piedrahita, *Contribución al conocimiento del comportamiento térmico y la gestión térmica de los motores de combustión interna alternativos*, Valencia, España, 2009.
- [18] F. SAE Electric, «<https://issuu.com/>,» [En línea]. Available: <https://issuu.com/iitbracing15/docs/pitstop>. [Último acceso: 08 06 2016].
- [19] C. Mesa, *The engine cooling system*, Livonia, 1997.
- [20] B. E. A. V. M. E. R. I. Zhelezko, *Termodinámica, Transferencia de Calor y Motores de Combustión Interna*, Minsk, 1985.
- [21] H. Wolf-Heinrich, *Aerodynamics of road vehicles*, Warrandale, 1998.
- [22] R. A. D. I. F. I. S. V. Zeitnetdinov, *Diseño de motores para automóviles y tractores*, Ulianovsk, 2004.
- [23] Y. A. Cengel, *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*, mexico: McGraw-hill interamericana, 2006.

- [24] KTM, «KTM,» Copyright 2016 KTM Sportmotorcycle GmbH, all rights reserved, 2016. [En línea]. Available: Copyright 2016 KTM Sportmotorcycle GmbH, all rights reserved. [Último acceso: 1 12 2016].
- [25] W. PRESS, «SANKEY DIAGRAMS,» PHU, [En línea]. Available: <http://www.sankey-diagrams.com/>. [Último acceso: 2 12 2016].
- [26] BOSCH, «BOSCH AUTO SHOP,» ROBERT BOSCH, 2015. [En línea]. Available: <https://au.bosch-automotive-shop.com/en/products/details/-/productdetails/0392020073/electric-water-pump-0392020073>. [Último acceso: 24 11 2016].
- [27] SCINTEX, «SCINTEX,» Scintex, 2016. [En línea]. Available: <https://www.scintex.com.au>. [Último acceso: 24 11 2016].
- [28] D. PALLAZHCO, «REPOSITORIO UPS,» DICIEMBRE 2014. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7853/1/UPS-CT004692.pdf>. [Último acceso: 24 11 2016].

## 10 ANEXOS

### ANEXO 1

FICHA TÉCNICA MOTO KTM DUKE 390	
Motor	Monocilindrico, Dohc 4 válvulas,
Refrigeración	Líquido
Cilindrada	373 c.c.
Torque máx.	33,8 Nm A 7.200 rpm
Potencia máx.	44 Hp a 9.000 rpm
Alimentación	Inyección electrónica
Encendido	Eléctrico
Transmisión	6 velocidades
Suspensión delantera	Telescópica invertida
Suspensión trasera	Mono amortiguador WP
Peso	150kg con tanque lleno

## ANEXO 2

**TABLA A-15**

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T, °C	Densidad, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, $c_p$ , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Viscosidad dinámica, $\mu$ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, $\nu$ , m <sup>2</sup> /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-6}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

### ANEXO 3

VALORES OBTENIDOS PARA REALIZAR LA FIRMA TÉRMICA		
Tiempo (segundos)	T entrada del radiador (°C)	T salida del radiador (°C)
0	21.7	20.7
15	24.8	23
30	28	25.6
45	30.7	28.8
60	33.2	30.9
75	36.8	34.5
90	39.5	37.4
105	42.7	40.8
120	44.9	42.7
135	47.5	45.4
150	48.3	46.6
165	49.8	47.8
180	51.7	49.8
195	53.5	51.9
210	55.2	52.2
225	56.2	54.2
240	57.7	55.8
255	59.4	57.4
270	61.1	58.9
285	62.3	60.9
300	64	62.2
315	65.4	63.7
330	66.1	61.4
345	67.2	61.6
360	67.9	62.4
375	68.5	62.6
390	69.1	63.1
405	69.5	63.8

<b>420</b>	70.1	64.4
<b>435</b>	70.2	64.8
<b>450</b>	71.2	65.5
<b>465</b>	71.9	66.6
<b>480</b>	72.2	66.7
<b>495</b>	72.9	67.3
<b>510</b>	73.5	67.8
<b>525</b>	73.9	68.5
<b>540</b>	74.3	68.8
<b>555</b>	75.2	69.4
<b>570</b>	75.4	69.1
<b>585</b>	76	69.8
<b>600</b>	76.6	70.6
<b>615</b>	76.7	70.6
<b>630</b>	77.6	71.9
<b>645</b>	78.5	72.4
<b>660</b>	78.6	72.7
<b>675</b>	79.1	73
<b>690</b>	80.1	73.4