

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA PARA EL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN POR BATERÍAS DE LITIO EN UN KART ELÉCTRICO.

JUAN FELIPE GÓMEZ DÍAZ

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2.020**

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA PARA EL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN POR BATERÍAS DE LITIO EN UN KART ELÉCTRICO.

JUAN FELIPE GÓMEZ DÍAZ

Proyecto Integral de Grado para optar el título de INGENIERO MECÁNICO

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2.020**

Nota de aceptación

Ing. Rodrigo Sorzano Dueñas

Ing. Ilmer Mosquera Aguilar

Bogotá D.C. Diciembre de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente De La Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Post-gradados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Programa de Ingeniería Mecánica

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Las directivas de la universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a su autor.

Agradezco inmensamente al Dios por todo el aprendizaje adquirido durante este proceso, a mi señora madre, quien me enseñó que las cosas que se inician se deben terminar, a mis amigos que estuvieron en todas las partes de este trabajo, en especial a David Santiago González, a William Hincapié, Eduardo Rodríguez y Julio Torres, a las nuevas amistades que forjé en el transcurrir de este proceso, y a una persona muy especial, que hizo de mis últimos días de esta etapa unos de los mejores.

CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	20
RESUMEN	21
INTRODUCCIÓN	22
1. CONTEXTO Y MARCO CONCEPTUAL	24
1.1 CONTEXTO DE LA SITUACIÓN	24
1.2 BATERÍAS EN ION DE LITIO	26
1.2.1 Breve reseña histórica	27
1.2.2 Componentes básicos	27
1.2.2.1 Ánodo	27
1.2.2.2 Cátodo	28
1.2.2.3 Electrolito	28
1.2.2.4 Separador	28
1.2.3 Funcionamiento	29
1.2.4 Tipos de baterías de ion de litio	31
1.2.5 Comportamiento de las baterías de ion de litio	32
1.2.6 Comportamiento en estado crítico	33
1.3 VEHÍCULOS TIPO GO-KART	35
1.3.1 Breve reseña histórica	36
1.3.2 Componentes básicos	37
1.3.2.1 Chasis	37
1.3.2.2 Tren motor	37
1.3.2.3 Baterías (Sólo en karts eléctricos)	37
1.3.2.4 Ruedas	38
1.3.2.5 Mecanismo de dirección	38
1.3.2.6 Otros componentes	38
1.4 COMPORTAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS TIPO GO-KART	39
1.4.1 Comportamiento en caso estático	39
1.4.1.1 Descripción de fuerzas	40
1.4.1.2 Comportamiento de agarre	40
1.4.2 Comportamiento en condiciones dinámicas	40
1.4.2.1 Cabeceo (Aceleración/Frenado críticos)	44
1.4.2.2 Balanceo (Curvas)	46
1.4.3 Condiciones de manejo real	48
1.5 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	50

1.5.1 Convección forzada de aire	50
1.5.2 Refrigeración líquida	51
1.5.2.1 Refrigeración directa	51
1.5.2.2 Refrigeración indirecta	52
1.5.3 Sistemas de refrigeración por materiales en cambio de fase	53
2. SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA	54
2.1 DEFINICIÓN	54
2.2 FUNCIONES DE UN SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA	54
2.2.1 Enfriamiento	55
2.2.2 Calentamiento	55
2.2.3 Aislamiento	55
2.2.4 Ventilación	55
2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA	55
2.3.1 Sistemas de gestión activa	56
2.3.2 Sistemas de gestión pasiva	56
2.4 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA BASADOS EN FLUIDOS	56
2.4.1 Medio térmico	56
2.4.1.1 Aire	56
2.4.1.2 Fluidos incompresibles (Líquidos)	57
2.4.1.3 Medio Mixto	57
2.4.2 Medio impulsor de fluido	57
2.4.2.1 Ventiladores	57
2.4.2.2 Bomba hidráulica	57
2.4.3 Medio de circulación	57
2.4.3.1 Ductos de ventilación	57
2.4.3.2 Tuberías hidráulicas	58
2.4.3.3 Almacenamiento de fluido refrigerante. (Sólo aplica para sistemas Con refrigeración líquida)	58
2.4.4 Medio de intercambio de calor	58
2.4.4.1 Conjuntos de aletas	58
2.4.4.2 Radiador	58
2.4.5 Controlador	58
2.5 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA BASADOS EN MATERIALES EN CAMBIO DE FASE	58
2.5.1 Funcionamiento	59
2.5.2 Materiales más comunes	60
2.6 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA	60
3. PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS	64

3.1 REQUERIMIENTOS BAJO REGLAMENTO FIA PARA KARTS ELÉCTRICOS	64
3.1.1 Batería	64
3.1.2 Dimensiones	64
3.1.3 Peso del vehículo	65
3.1.4 Seguridad eléctrica	65
3.1.5 Voltaje de operación máximo	65
3.2 PARÁMETROS DESEADOS	65
3.2.1 Motor	65
3.2.2 Rangos de temperatura	67
3.2.3 Tiempo de duración de carrera	68
4. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	69
4.1 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA	69
4.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN MEDIANTE EL USO DE CONVECCIÓN FORZADA DE AIRE	69
4.3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN LÍQUIDA BASADO EN INTERCAMBIADOR DE CALOR AGUA-AIRE	71
4.4 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN BASADO EN MATERIALES EN CAMBIO DE FASE (PCM)	73
4.5 EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	74
5. DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA	77
5.1 SUBSISTEMAS INVOLUCRADOS	77
5.2 SUBSISTEMA DE POTENCIA	77
5.2.1 Capacidad de la batería	77
5.2.2 Energía disponible da batería	78
5.2.3 Selección de celda electroquímica	79
5.2.4 Propiedades de celda	79
5.2.5 Número de celdas	81
5.2.6 Espacio disponible para baterías	82
5.2.7 Dimensionamiento de módulo	82
5.2.8 Generación de calor	83
5.3 FLUIDOS DE TRABAJO	84
5.3.1 Agua	84
5.3.2 Aire	84
5.4 SUBSISTEMA DE INTERCAMBIO TÉRMICO	85
5.4.1 Ecuación de gobierno	86
5.4.2 Datos térmicos de entrada	86
5.4.2.1 Carga térmica	86
5.4.2.2 Diferencia de temperatura del aire	86

5.4.2.3 Diferencia de temperatura del refrigerante	87
5.4.2.4 Flujo másico del aire	88
5.4.2.5 Flujo másico de refrigerante	89
5.4.3 Datos geométricos de entrada	89
5.4.3.1 Dimensiones globales	89
5.4.3.2 Tubería de refrigerante	90
5.4.3.3 Dimensiones de aleta	92
5.4.4 Diferencia logarítmica de temperatura	92
5.4.5 Coeficiente global de transferencia de calor	94
5.5.5.1 Relación de áreas	94
5.4.5.2 Coeficiente convectivo del área externa	96
5.4.5.3 Coeficiente convectivo de transferencia de calor del refrigerante	103
5.4.5.4 Resistencia de muro	104
5.4.5.5 Solución del coeficiente global de transferencia de calor	105
5.4.6 Área del intercambiador de calor	105
5.4.7 Parámetros finales	106
5.4.7.1 Caída de presión	106
5.4.7.2 Cantidad de refrigerante en intercambiador	107
5.4.8 Especificaciones finales	109
5.5 SUBSISTEMA DE CIRCULACIÓN DE FLUIDO DE REFRIGERACIÓN	110
5.5.1 Caudal del refrigerante	110
5.5.2 Tubería rígida	111
5.5.2.1 Espacio total disponible para compartimiento	111
5.5.2.2 Velocidad mínima de fluido y selección de diámetro hidráulico	112
5.5.2.3 Sección transversal del perfil rectangular	112
5.5.2.4 Longitud de tubería	114
5.5.2.5 Comportamiento de tubería rígida	117
5.5.3 Puerto de conexión	118
5.5.3.1 Altura del puerto	118
5.5.3.2 Ancho del puerto	118
5.5.3.3 Base del puerto	119
5.5.3.4 Modelo final	119
5.5.4 Tubería flexible	119
5.5.4.1 Material de tubería y dimensionamiento	120
5.5.4.2 Comportamiento	121
5.5.5 Sistema de propulsión de fluido	122
5.6 SUBSISTEMA DE CONTROL	123
5.6.1 Descripción del proceso	124
5.6.2 Parámetros de entrada	126
5.6.2.1 Set-Point	126

5.6.2.2 Temperatura de encendido	127
5.6.3.3 Temperatura de apagado	127
5.6.3 Controlador On-Off	128
5.6.3.1 Funcionamiento del controlador	128
5.6.3.2 Selección de relé controlador	128
5.6.3.3 Especificaciones finales	129
5.7 SUSBSISTEMA ESTRUCTURAL	129
5.7.1 Diseño de compartimiento de batería con tubería de refrigeración	129
5.7.2 Estado de cargas estructurales del compartimiento	130
5.7.2.1 Peso total de batería por módulo	130
5.7.2.2 Análisis de fuerzas del compartimiento	131
5.7.2.3 Grosor mínimo de pared inferior requerido	132
5.7.3 Dimensiones principales	133
6. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA MEDIANTE SIMULACIÓN	136
6.1 COMPONENTE CRÍTICO A SIMULAR	136
6.2 PROCESO DE SIMULACIÓN	137
6.2.1 Enmallado	137
6.2.2 Aplicación de cargas térmicas y condiciones de borde	139
6.2.3 Ejecución de simulación	140
6.2.4 Análisis de resultados	140
7. MANUALES	142
7.1 MANUAL DE INSTALACIÓN	142
7.1.1 Ensamble de compartimientos de batería	142
7.1.2 Instalación de componentes	143
7.1.3 Conexiones	143
7.2 MANUAL DE OPERACIÓN	144
7.3 MANUAL DE MANTENIMIENTO	145
7.3.1 Protocolo de inspecciones	145
7.3.2 Protocolos de falla	145
8. IMPACTO AMBIENTAL	147
8.1 RECURSOS INVOLUCRADOS	147
8.1.1 Materiales sólidos metálicos	147
8.1.1.1 Puntos a favor	147
8.1.1.2 Puntos en contra	148
8.1.2 Materiales sólidos no metálicos	148
8.1.2.1 Puntos a favor	148
8.1.2.2 Puntos en contra	149

8.1.3 Fluido refrigerante	149
8.2 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	150
8.2.1 Parámetros de evaluación	150
8.2.2 Factores a evaluar	151
8.2.2.1 Obtención de recursos	151
8.2.2.2 Fabricación	152
8.2.2.3 Residuos post-vida útil	152
8.2.2.4 Salud del piloto	152
8.2.2.5 Salud de los mecánicos	152
8.2.3 Matriz de impacto ambiental	152
8.2.4 Análisis de resultados	154
9. VIABILIDAD FINANCIERA DEL PROYECTO	155
9.1 COSTOS	155
9.1.1 Costos de ingeniería	155
9.1.2 Costo de componentes seleccionados	156
9.1.3 Costo de fabricación de componentes a medida	157
9.1.4 Total de costos involucrados	158
9.2 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD FINANCIERA	158
9.2.1 Capital movido en la industria	159
9.2.2 Valor presente neto	159
9.2.3 Viabilidad financiera	160
10.CONCLUSIONES	161
11.RECOMENDACIONES	162
BIBLIOGRAFÍA	163
ANEXOS	168

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tipos Comunes de baterías de ion de litio según composición material de cátodo. Los compuestos marcados con asterisco ya se encuentran obsoletos y no se utilizan más en la industria	31
Cuadro 2. Elaboración de parámetros de evaluación para la selección de alternativas de solución	63
Cuadro 3. Comparación entre las ventajas y desventajas de la alternativa de solución de convección forzada por aire.	70
Cuadro 4. Comparación entre las ventajas y desventajas de la presente alternativa de solución por refrigeración líquida	72
Cuadro 5. Comparación entre las ventajas y desventajas de la alternativa de solución con materiales PCM	73
Cuadro 6. Cuadro de control de inspecciones de mantenimiento	145
Cuadro 7. Fallas más comunes	146
Cuadro 8. Materiales metálicos involucrados	147
Cuadro 9. Materiales no metálicos involucrados	148
Cuadro 10. Criterios de evaluación	150
Cuadro 11. Clasificación de impacto ambiental	151
Cuadro 12. Matriz EPM de impacto ambiental	153

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor seleccionado	67
Tabla 2. Criterios de selección para ser aplicados en el método de scoring con sus respectivos valores porcentuales	69
Tabla 3. Criterio de selección aplicado a la primera alternativa de solución	71
Tabla 4. Criterio de selección aplicado a la segunda alternativa de solución	73
Tabla 5. Criterio de selección aplicado a la tercera y última alternativa de solución	74
Tabla 6. Método de ponderación scoring para las alternativas de solución planteadas	75
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la celda seleccionada	81
Tabla 8. Propiedades del refrigerante a una temperatura de 40°C	84
Tabla 9. Propiedades del aire estándar a una temperatura de 25°C	85
Tabla 10. Restricciones geométricas de aleta	92
Tabla 11. Restricciones de espaciamiento entre tubos y aletas	97
Tabla 12. Especificaciones finales del intercambiador	109
Tabla 13. Comparación de especificaciones de bomba y cálculos de sistema	123
Tabla 14. Especificaciones de malla de celda	138
Tabla 15. Especificaciones de malla de tubería	138
Tabla 16. Condiciones de borde de la presente simulación	139
Tabla 17. Resultados de simulación de celda	141
Tabla 18. Costos de ingeniería	156
Tabla 19. Costo de componentes seleccionados	157
Tabla 20. Costos de fabricación	158
Tabla 21. Costo total de proyecto	158

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Automóvil del piloto de Fórmula E Pascal Wehrlein, quien perdió la válida de Santiago, Chile, por un problema de recalentamiento de baterías	25
Imagen 2. Vehículo de prueba Tesla Model S, que pretenda utilizarse en el nuevo campeonato Electric GT, el cual aún presenta problemas de recalentamiento de baterías, a pesar de su sistema de refrigeración. Este es el mayor problema que enfrentan los vehículos eléctricos en el mundo del automovilismo y en general	26
Imagen 3. Batería de ion de litio de 48 volts	26
Imagen 4. Descripción gráfica de las partes de una celda que funciona por Iones de litio	29
Imagen 5. Gráfica de parámetro C de carga y descarga para batería de compuesto LiFePO4 con su respectiva curva de degradación según el número de ciclos	32
Imagen 6. Rango de operación de las baterías de litio a nivel general	34
Imagen 7. Perfil de temperaturas de rango ideal teórico en una batería de ion de litio	34
Imagen 8. Descripción gráfica del comportamiento de una batería de ion de litio a condiciones críticas de temperatura	35
Imagen 9. Perfil de temperaturas de rango óptimo en una batería de ion de litio	35
Imagen 10. Kart de competición de la marca Sodikart, uno de los fabricantes más grandes del sector	36
Imagen 11. Esquemático del funcionamiento de baterías de ión de litio en un kart eléctrico	38
Imagen 12. Kart eléctrico BSR 02 de 25kW	38
Imagen 13. Diagrama de fuerzas correspondiente al caso estático del vehículo	39
Imagen 14. Comportamiento de agarre en el vehículo en condición estática	40
Imagen 15. Diagrama de cuerpo libre correspondiente al proceso de inicio del movimiento del kart	41
Imagen 16. Círculo de tracción con gráfica de agarre ideal en el proceso teórico de tomar una curva	43
Imagen 17. Diagrama de Cuerpo Libre del kart durante el proceso de frenado a su máxima capacidad	44
Imagen 18. Diagrama de Cuerpo Libre del kart durante el proceso de aceleración a su máxima capacidad	45

Imagen 19. Comportamiento de agarre y su influencia en las fuerzas aplicadas durante el movimiento de cabeceo	46
Imagen 20. Fuerzas principales en toma de curva; en este caso, tomar una curva a la izquierda	47
Imagen 21. Agarre en curvas	48
Imagen 22. Trayectoria ideal de diversos tipos de curva	49
Imagen 23. Kartódromo de Sarno, Italia. Uno de las pistas más reconocidas del mundo, sede campeonatos de renombre internacional	49
Imagen 24. Sistema de refrigeración de baterías usando aire en automóvil híbrido Toyota Prius	50
Imagen 25. Chill Plate empleado para refrigeración de baterías para modelo Mercedes-Benz S400 Híbrido	52
Imagen 26. Vista esquemática de un sistema de refrigeración líquida indirecta	52
Imagen 27. Refrigeración líquida indirecta aplicada a un vehículo de Formula E	53
Imagen 28. Sistema de gestión térmica para vehículo Audi e-tron	54
Imagen 29. Esquema de un sistema de gestión térmica para baterías De litio mediante el uso de materiales PCM	59
Imagen 30. Representación de sistema de enfriamiento mediante el uso de materiales en cambio de fase (PCM)	59
Imagen 31. Gráfica de funcionamiento de los sistemas de gestión térmica basados en materiales tipo PCM.	60
Imagen 32. Mapa conceptual de síntesis para sistemas de gestión térmica	61
Imagen 33. Esquema del sistema de gestión térmica a diseñar	62
Imagen 34. Motor eléctrico Motenergy ME 1507	66
Imagen 35. Curva de rendimiento del motor conectado a una fuente de 96 volts	66
Imagen 36. Bosquejo de la alternativa de solución basada únicamente en aire	70
Imagen 37. Bosquejo de la alternativa de solución basada en la refrigeración líquida	72
Imagen 38. Bosquejo de la alternativa de solución basada en materiales tipo PCM	74
Imagen 39. Celda electroquímica ECPC Fortune 60Ah	80
Imagen 40. Curva de rendimiento a parámetro 0,5C	80
Imagen 41. Esquema de localización de las baterías	82
Imagen 42. Módulo de baterías del kart	83
Imagen 43. Esquema de temperaturas del intercambiador de calor	88
Imagen 44. Radiador New Line Serie R	90
Imagen 45. Dimensiones de referencia para tubería del intercambiador de calor	91

Imagen 46. Gráfica de factor de corrección para intercambiadores de calor de flujo cruzado	93
Imagen 47. Parametrización del máximo número de tubos del intercambiador según restricciones dimensionales	96
Imagen 48. Gráfica de coeficiente μ_r	102
Imagen 49. Tabla de valores para resistencia de contacto para metales	104
Imagen 50. Valores representativos para coeficiente global de transferencia de calor	105
Imagen 51. Sección interna del Intercambiador de calor	106
Imagen 52. Compartimiento lateral de refrigerante del intercambiador	108
Imagen 53. Intercambiador de calor	110
Imagen 54. Máximo Espacio disponible para compartimientos de batería del kart	111
Imagen 55. Dimensiones básicas de celda electroquímica	113
Imagen 56. Sección transversal de tubería de refrigeración	114
Imagen 57. Propuesta de tubería rígida para refrigeración de batería	115
Imagen 58. Tubería de refrigeración	116
Imagen 59. Puerto de conexión	119
Imagen 60. Tubería flexible (Imagen de referencia)	120
Imagen 61. Diagrama de tubería flexible en el kart	121
Imagen 62. Bomba eléctrica EBP15	123
Imagen 63. Descripción de proceso de control del BMS en vehículo eléctrico	124
Imagen 64. Manejo térmico del BMS	125
Imagen 65. Diagrama de flujo del control del sistema	126
Imagen 66. Ventana de operación del controlador	127
Imagen 67. Esquema de funcionamiento de controlador on-off	128
Imagen 68. Relé controlador	129
Imagen 69. Carga distribuida de compartimiento	130
Imagen 70. Diagrama de fuerzas de compartimiento	131
Imagen 71. Compartimiento de baterías	135
Imagen 72. Ensamble módulo de baterías	135
Imagen 73. Ensamble tubería de refrigeración	136
Imagen 74. Celda con tubería de refrigeración	137
Imagen 75. Enmallado de celda con tubería	138
Imagen 76. Condiciones de borde en celda con tubería	139
Imagen 77. Perfil de temperaturas de celda con tubería	140
Imagen 78. Calor residual	141
Imagen 79. Módulo de baterías ensamblado	143
Imagen 80. Botones de operación del vehículo	144
Imagen 81. Comparación de energía usada en ciertos polímeros	149

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción química en el cátodo de una batería de litio de tipo LiFePO_4	29
Ecuación 2. Reacción química en el ánodo de una Batería de litio de tipo LiFePO_4	29
Ecuación 3. Reacción química total de una batería de litio de tipo LiFePO_4	29
Ecuación 4. Fuerza de arrastre	41
Ecuación 5. Fórmula de fuerza de rodaje	42
Ecuación 6. Método de ponderación por scoring, seleccionado para toma de decisiones Multi-criterio	75
Ecuación 7. Capacidad de batería	78
Ecuación 8. Energía de batería	78
Ecuación 9. Número de celdas	81
Ecuación 10. Generación de calor	83
Ecuación 11. Balance energético general de un sistema de gestión térmica basado en fluidos	85
Ecuación 12. Ecuación de gobierno de intercambiadores de calor	86
Ecuación 13. Expresión de flujo másico de un fluido a través de una tubería	91
Ecuación 14. Formula de coeficiente de transferencia de calor global para intercambiadores de calor	94
Ecuación 15. Fórmula de coeficiente convectivo estándar para intercambiadores de calor de flujo cruzado	96
Ecuación 16. Fórmula de coeficiente C_q para intercambiadores de flujo cruzado	97
Ecuación 17. Fórmula de área de circulación de aire para intercambiadores de flujo cruzado	98
Ecuación 18. Fórmula para el coeficiente convectivo del aire	100
Ecuación 19. Correlación de Petukhov para factor de Fricción	103
Ecuación 20. Correlación de Petukhov para número de Nusselt	103
Ecuación 21. Caídas de presión intercambiador de calor	107
Ecuación 22. Fórmula de impacto ambiental	151
Ecuación 23. Valor presente neto	159

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Dimensiones del vehículo por reglamento	169
Anexo B. Catálogo de tubería para intercambiador de calor	172
Anexo C. Catálogo de referencia tubería rígida para el módulo de batería	173
Anexo D. Catálogo de bomba eléctrica para subsistema de circulación de fluido	174
Anexo E. Catálogo de relé controlador	175
Anexo F. Ilustraciones del manual de instalación: compartimiento de baterías	176

GLOSARIO

BMS: sistema de gestión de batería, el cual se encarga de controlar la totalidad de variables involucradas en las baterías, desde el balanceo de voltaje y niveles de corriente, hasta las temperaturas involucradas.

CIK: siglas de la comisión internacional de karting, máximo ente regulador del kartismo, cobijado bajo la FIA.

FIA: siglas pertenecientes a la Federación Internacional del Automóvil, máximo ente regulador del automovilismo.

GESTIÓN TÉRMICA: administración de variables asociadas con la temperatura, de acuerdo con una necesidad o aplicación específica.

RESUMEN

El kartismo se ha consolidado como una de las actividades de entretenimiento más boyantes en la actualidad, además de ser el primer paso en el automovilismo a aquellas personas interesadas en esta práctica deportiva. El aumento en el desarrollo de vehículos eléctricos, enfatizando en las baterías de ion de litio ha impactado de forma positiva esta actividad, asimismo trayendo ciertas dificultades, tales como el sobrecalentamiento de estas unidades de potencia. Por tal razón, fue necesario diseñar un sistema que pueda mantener estas fuentes de potencia en un rango apropiado de temperaturas, el cual garantiza las propiedades óptimas de las baterías en la aplicación de estos vehículos.

Palabras clave: Batería de ion de litio, gestión térmica, kart, refrigeración, vehículo eléctrico.

INTRODUCCIÓN

La creciente conciencia a nivel ambiental acerca del uso de las energías fósiles, ha llevado a la industria de fabricación de karts (comenzando por el sector recreativo) optar por el camino de la electrificación de sus productos. Dado que, la principal fuente de potencia de estos vehículos está conformada por baterías de ion de litio (altamente conocidas por su degradación prematura), las cuales adquieren temperaturas en funcionamiento superiores a los cuarenta grados Celsius, ocasionando una pérdida prematura en la autonomía del kart por carga, la cual está estimada en sesenta minutos de duración generando así el cambio frecuente de dichas baterías.

El *objetivo general* del presente trabajo es diseñar un sistema de gestión térmica para el sistema de alimentación por baterías de litio en un kart eléctrico.

Con el fin de desarrollar el objetivo previamente mencionado, se recurrirá al desarrollo y cumplimiento de los siguientes objetivos específicos.

- Investigar el comportamiento de las baterías de litio a temperaturas que puedan alterar su correcto funcionamiento
- Conocer el comportamiento estático y dinámico de un kart
- Elaborar el marco conceptual del sistema a diseñar
- Establecer los parámetros y requerimientos mínimos para el diseño
- Evaluar alternativas de solución al problema
- Realizar el diseño detallado de los componentes del sistema seleccionado
- Analizar el comportamiento del diseño a nivel térmico, mediante uso de software
- Elaborar planos de fabricación del sistema seleccionado
- Elaborar manuales de instalación, operación y mantenimiento
- Evaluar el impacto ambiental generado
- Elaborar la evaluación financiera del proyecto

La *importancia* de este trabajo radica en la adición de un sistema de gestión térmica a las baterías de karts eléctricos, lo cual establecerá un precedente en el desarrollo de estas plantas de poder, acelerando el proceso de masificación de esta tecnología y poniéndola al mismo nivel usado en los automóviles eléctricos, con el fin de aumentar la eficiencia del sistema y reduciendo costos sin descuidar las condiciones de espacio y balance de estos aparatos. Se tomarán como ejemplo los vehículos monoplazas del campeonato ABB FIA Formula E Championship, los cuales cuentan con un sistema de gestión térmica exclusivo para sus baterías con el fin de evitar las pérdidas de potencia causadas por el recalentamiento de las mismas y mantener así su confiabilidad durante las sesiones de práctica, clasificación y en carrera.

El desarrollo del proyecto se inicia con la búsqueda de información acerca de los fenómenos a estudiar y la respectiva fundamentación teórica a nivel matemático relacionada con el funcionamiento de sistemas eléctricos basados en baterías de litio en la industria automotriz. Adicionalmente, se tendrán en cuenta los análisis estático y dinámico presentes en vehículos usados para kartismo, finalizando con los fundamentos básicos de diseño para sistemas de refrigeración a pequeña escala. El cronograma será tenido en cuenta para cumplir los objetivos estipulados en el tiempo adecuado. Se establecerán los parámetros y requerimientos necesarios para proceder a la elaboración de un diseño conceptual que cumpla con las especificaciones preliminares.

El paso siguiente es la obtención y evaluación de alternativas de solución, con el fin de seleccionar la más adecuada. La alternativa elegida será estudiada de forma analítica, realizando los cálculos necesarios en los componentes estudiados para su posterior comparación mediante el uso de software de diseño y simulación como Solid Edge y NX. Este paso validará la selección de la alternativa y los puntos de mayor criticidad en el proyecto. Con la corroboración de los datos, se elaborará el diseño detallado de los componentes y sus respectivos manuales de instalación, operación y mantenimiento. El proyecto concluirá con su correspondiente evaluación financiera y el impacto ambiental generado.

Al final, todo el desarrollo de proyecto será presentado en forma de documento incluyendo anexos, planos y manuales acorde con los estándares exigidos por la universidad.

1. CONTEXTO Y MARCO CONCEPTUAL

Desde el descubrimiento de la energía eléctrica en el siglo XIX, el concepto de energía ha tomado una perspectiva diferente y un valor de mayor importancia para la raza humana; haciendo que la electricidad esté más presente en su historia que en otras épocas, contribuyendo al desarrollo monumental a nivel tecnológico presentado en la actualidad. Hoy en día, el uso de las baterías de ion de litio se ha incrementado en un 8% anualmente¹ y tiene presencia en la totalidad de países a nivel mundial, siendo uno de los elementos de mayor importancia en el desarrollo de dispositivos que funcionan con energía eléctrica. Una de las más recientes aplicaciones de esta clase de equipamiento, está en los vehículos de tipo kart, los cuales se han convertido en el modo más utilizado por pilotos de carreras a nivel mundial para iniciar sus carreras a nivel deportivo, y conformando una de las disciplinas deportivas a motor más exigentes en la actualidad; o simplemente una forma alternativa de pasar el tiempo con fines recreativos.

1.1 CONTEXTO DE LA SITUACIÓN

Las baterías de ion de litio son las más usadas en la actualidad como fuentes de almacenamiento de energía en vehículos eléctricos, las cuales funcionan mediante reacciones químicas altamente volátiles, donde un corto-circuito al interior de estas unidades puede causar estragos debido al potencial de una posible explosión. Afortunadamente, estos vehículos también cuentan con unidades de control de potencia eléctrica, las cuales se encargan de controlar el voltaje de operación del sistema, evitando estas posibles explosiones en la mayoría de las ocasiones, pero desactivan la entrada de potencia cuando se requiere. Si esto sucede en medio de una carrera, ocasionaría pérdidas económicas para los negocios de rental karts, y afectaría negativamente a los equipos de carreras que usan estos vehículos debido a carreras no finalizadas, ocasionando pérdidas de patrocinadores.

Por otro lado, el sobrecalentamiento constante de las baterías de ion de litio provoca una reducción prematura de la vida útil, debido a la afección de las propiedades de la batería, requiriendo más tiempo para el proceso de carga y haciendo que ésta tienda a durar menos tiempo de lo estipulado; siendo una de las principales contras en los vehículos eléctricos. Por tal razón, muchas unidades precisan de cambio constante en sus baterías, siendo el mayor obstáculo en la

¹ Trade Map - Lista de los países importadores para el producto seleccionado en 2017 (Pilas y baterías de pilas, eléctricas; sus partes (excl. inservibles)). [Consultado el Nov. 29,2018]. Disponible

en: https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=3||||8506|||4|1|1|1|1|2|1|1

normalización de esta forma de energía en los deportes a motor. En este caso, se decide estudiar a los vehículos tipo go-kart que funcionan con energía eléctrica, debido a que esta clase de automotores pretende ser usada para llevar al automovilismo a ser la primera disciplina deportiva a motor en participar en juegos olímpicos de forma oficial en el 2024² y posteriores, después de la aparición del automovilismo como deporte de exhibición en los juegos de París 1900. Para el presente proyecto se opta por escoger a los karts, debido a que es una de las aplicaciones más nuevas de los trenes de propulsión eléctricos, y se tiene como base la investigación y desarrollo aplicados a vehículos eléctricos de mayor tamaño; así que viene siendo una alternativa muy completa para el desarrollo y la investigación de energías alternativas. Es necesario incluir el hecho que esta clase de vehículos es comúnmente el primer paso para ingresar en la élite del deporte a motor, ayudando a crear una mayor conciencia ambiental desde una temprana edad, aunque esto también es aplicable a cualquier persona sin importar su edad. Otra de las razones para escoger a los karts es por la gran oportunidad que ofrecen para la democratización del deporte, haciéndolo más accesible para una mayor parte de la población y reduciendo sus costos a mediano y largo plazo, debido a que se eliminan ciertas restricciones que los karts de motor de combustión interna presentan en ciertos espacios, y más aún los de tipo semi-pro y profesional, los cuales tienden a usar motores de combustión interna de dos tiempos.

Imagen 1. Automóvil del piloto de Fórmula E Pascal Wehrlein, quien Perdió la válida de Santiago, Chile, por un problema de recalentamiento De baterías



Fuente: LARKAM, Lewis. 'Critical' overheating battery issue cost Wehrlein shot at win. -01-27T10:49:14+00:00. [Consultado el Jun. 7,2019].
Disponble en: <https://www.crash.net/fe/news/912250/1/critical-overheating-battery-issue-cost-wehrlein-shot-win>

² MITCHELL, Scott and FERREIRA, Bruno. Massa targets karting in 2024 Olympics. Aug 11,. [Consultado el Aug 8,2019]. Disponible en: <https://www.motorsport.com/kart/news/massa-targets-karting-in-2024-olympics/3156982/>

Imagen 2. Vehículo de prueba Tesla Model S, que pretenda utilizarse en El nuevo campeonato Electric GT, el cual aún presenta problemas de Recalentamiento de baterías, a pesar de su sistema de refrigeración. Este es el mayor problema que enfrentan los vehículos eléctricos en el Mundo del automovilismo y en general.



Fuente: KLJAIC, Vanja. Electric GT Tesla Model S Suffers From Malfunction On Track [Consultado en Mar 7, 2019] Disponible en: <https://insideevs.com/electric-gt-tesla-model-s-overheated-after-just-lap-and-a-half/>

1.2 BATERÍAS DE ION DE LITIO

Las baterías de ion de litio son elementos de almacenamiento de energía, la cual es transformada en electricidad mediante un conjunto de reacciones químicas, teniendo la particularidad de ser reacciones de tipo reversible, permitiendo que el proceso de suministro de diferencias de potencial eléctrico, se pueda repetir en varias ocasiones.

Imagen 3. Batería de ion de litio de 48 volts



Fuente: EDELSTEIN, Stephen. Will Small 48-Volt Lithium-Ion Battery Boost Start-Stop In U.S. Cars? [Consultado el Dec 20, 2018]. Disponible en: <https://www.greencarreports.com>

1.2.1 Breve reseña histórica. Las primeras baterías de litio surgieron de forma experimental en los años 1970 y 1980, donde se impulsaron las investigaciones acerca del comportamiento del litio ante fenómenos de tipo eléctrico, presentado cierta inestabilidad y proclive a cortocircuitos. La primera empresa que comercializó esta clase de baterías fue Sony en el año de 1.991, gracias a un estudiante ex empleado de la empresa NTT y el físico estadounidense John Goodenough, quien ha recibido varios reconocimientos por el desarrollo, a pesar de no poder mantener patente de Sony. El desarrollo continúa hasta la actualidad, donde se pueden conseguir baterías de 18650 celdas y capacidad de 3000 mAh como el estándar más común en existencia para la microelectrónica.³ Con respecto a su aplicación en vehículos eléctricos, esta clase de fuentes de almacenamiento de energía se empiezan a usar en 2.008 en la primera generación del automóvil Tesla Roadster, en asociación con Panasonic, usando celdas con capacidad de 3.1 Ah, dando un alcance de 390 kilómetros. En la actualidad, ya se están implementando baterías con capacidad de almacenamiento de 250 Ah y de suministro hasta 100 kWh.

1.2.2 Componentes básicos. Las baterías de ion de litio se componen de unas sub-unidades conocidas como celdas electroquímicas, las cuales tienen básicamente cuatro componentes que se mencionarán a continuación.

1.2.2.1 Ánodo. Es el polo negativo de la celda⁴. Esta parte se encarga de recibir los iones de litio provenientes del cátodo durante el proceso de descarga, permitiendo el paso de la corriente eléctrica a los circuitos eléctricos a través del flujo de electrones producido por las respectivas reacciones. El ánodo es el lugar de almacenamiento de energía cuando la batería se encuentra en proceso de carga. Los materiales más usados para su fabricación son aleaciones derivadas de litio y carbono.

³ CADEX ELECTRONICS INC. Lithium-based Batteries Information. [Consultado el Nov 29,2018]. Disponible

en: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lithium_based_batteries

⁴ SAMSUNG SDI CO.Ltd. The Four Components of a Li-ion Battery. [Consultado el Dec 4,2019]. Disponible en: <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html?listType=gallery>

1.2.2.2 Cátodo. Es el polo positivo⁵, siendo la fuente de almacenamiento de los iones de litio. Esta sección de la celda determina el voltaje de operación, su respectiva capacidad y el tipo de batería. Cabe resaltar que el litio es un material muy inestable cuando se manipula con un alto grado de pureza, por lo cual es necesario el proceso de aleación con otros metales con el fin de garantizar el buen funcionamiento del sistema. Los materiales con los que se suele fabricar este componente son un conjunto de aleaciones, donde las más conocidas son los polímeros de litio (LiPo), Aleaciones de cobalto (LiCoO₂), Fosfatos de hierro - litio (LiFePO₄) y manganeso tipo LMO (LiMn₂O₄) y NMC(LiNiMnCoO₂), siendo estas últimas las más utilizadas en vehículos eléctricos.⁶

1.2.2.3 Electrolito. Es un fluido distribuido al interior de la totalidad de la celda, que permite el movimiento de los iones de litio entre el ánodo y el cátodo, asimismo, evitando el flujo de electrones entre las regiones de cada celda, junto con el separador. Está conformado por un fluido compuesto de varias sales, las cuales permiten la movilidad exclusiva de los iones; solventes, que son líquidos de tipo orgánico que disuelven las respectivas sales y aditivos, variantes según el uso y la aplicación de la batería. Recientemente, se están experimentando con electrolitos en estado sólido, parte de los nuevos desarrollos involucrados se centran en el uso de materiales cerámicos con altas cargas iónicas que reemplacen los fluidos de trabajo previamente descritos.⁷

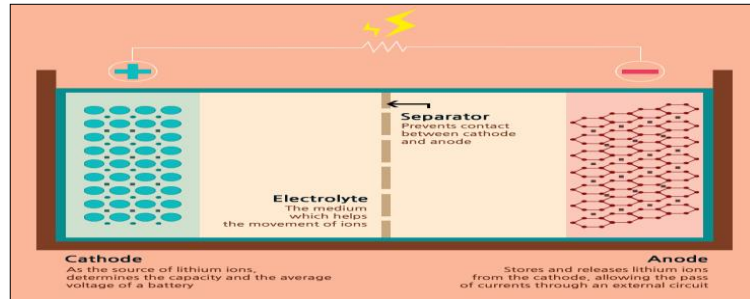
1.2.2.4 Separador. Es una barrera física, cuyo objetivo es la separación del ánodo y el cátodo, con el fin de evitar el flujo directo de electrones. Por lo general, esta barrera se fabrica a base de materiales poliméricos, entre los que se encuentra el polietileno y polipropileno, compuesta de varias porosidades microscópicas para permitir el paso de los iones de litio. Este componente, junto con el electrolito, conforma la sección más importante de la batería, ya que determinan su correcto funcionamiento durante su vida útil.

⁵ Ibíd. p.1

⁶ VILA ROMERO, Jordi. Proyecto De Un Kart Eléctrico. Universidad Politécnica de Catalunya, 2016.

⁷ TATSUMISAGO, Masahiro; NAGAO, Motohiro y HAYASHI, Akitoshi. Recent development of sulfide solid electrolytes and interfacial modification for all-solid-state rechargeable lithium batteries. En: Journal of Asian Ceramic Societies. Mar 1, . vol. 1, no. 1, p. 17-25

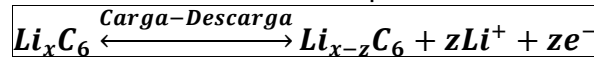
Imagen 4. Descripción gráfica de las partes de una Celda que funciona por iones de litio



Fuente: SAMSUNG SDI. The Four Components of a Li-ion Battery. [Consultado el Dec 20, 2018]. Disponible en: <http://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html?listType=gallery>

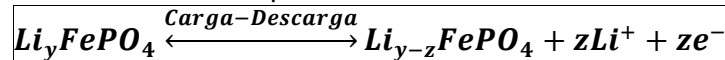
1.2.3 Funcionamiento. Las baterías de ion de litio funcionan mediante un conjunto de reacciones químicas, las cuales varían dependiendo de los materiales y sus correspondientes aleaciones utilizadas en el proceso de fabricación del dispositivo. Estas reacciones ocurren tanto en el electrodo positivo como en el negativo, dando como resultado una reacción global que rige todo el sistema.

Ecuación 1. Reacción química en el cátodo
De una batería de litio de Tipo LiFePO4



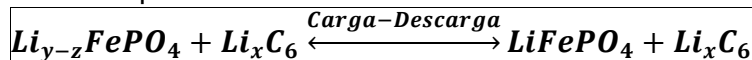
Fuente: AN Zhoujian JIA Li DING Yong
DANG Chao LI Xuejiao. A Review on
Lithium-ion Power Battery Thermal
Management Technologies and Thermal
Safety. vol. 26, no. 5, p. 391-412

Ecuación 2. Reacción química en el ánodo de una
Batería de litio de Tipo LiFePO4



Fuente: ibíd; p. 393

Ecuación 3. Reacción química total de una batería de
Litio de Tipo LiFePO4



Fuente: AMIRIBAVANDPOUR, Parisa. Modelling of
Batteries in Electric Vehicles. Swinburne University of
Technology, 2017. *Modificada de forma propia para que
Coincida notación

Como producto de las susodichas reacciones, se liberan iones de litio positivos y electrones, generando la corriente eléctrica a utilizar. Este comportamiento es exactamente igual sin importar la composición química de los electrodos. Cabe resaltar que estas reacciones químicas liberan calor, cuyo exceso afecta la densidad energética.

El movimiento de estos componentes se da de una región a otra (cátodo a ánodo) según la fase ejecutada, ya sea descarga o carga, debido a la reversibilidad de la reacción dada por el movimiento de los iones de litio entre ambas regiones de la batería a través del conjunto electrolito y separador. Los electrones en movimiento que forman la corriente eléctrica se mueven a través de unos colectores ubicados en los extremos de la celda electroquímica, fabricados en materiales con alta conductividad como cobre para el electrodo negativo, y aluminio para el electrodo positivo.

Debido al tipo de energía utilizada para el funcionamiento de las baterías es de tipo químico, es de esperar que se presenten pérdidas por calor, las cuales son el mayor desafío para la obtención de eficiencia en toda máquina. Para los sistemas eléctricos, existen tres tipos de pérdidas de esta índole, las cuales son calor óhmico, calor por polarización y calor de reacción.⁸ Las pérdidas de calor de carácter óhmico y por polarización son de tipo irreversible, ya que son provocadas por las resistencias del circuito y la generación de potencial eléctrico; estas pérdidas calóricas son directamente proporcionales al tamaño de la batería y la velocidad de reacción química, provocando. El calor generado por la reacción química es de tipo reversible, y muchas veces se desprecia cuando se trabaja con vehículos debido al impacto casi inexistente que éste genera en el funcionamiento de la máquina.

⁸ AN Zhoujian JIA Li DING Yong DANG Chao LI Xuejiao. A Review on Lithium-ion Power Battery Thermal Management Technologies and Thermal Safety. En: 热科学学报：英文版. vol. 26, no. 5, p. 391-412

1.2.4 Tipos de baterías de ion de litio. Estas baterías se clasifican según el tipo de agentes aleantes utilizados para la fabricación del cátodo de éstas, ya que el material del ánodo suele ser grafito. Debido a que el litio por sí solo es un material algo inestable, tal como se puede apreciar en su respectiva evolución histórica. Los materiales utilizados para las aleaciones varían de acuerdo a la aplicación y necesidad energética a resolver, junto con factores asociados a costos, seguridad, rendimiento, vida útil, energía y potencia específica. Cada tipo de batería de ión de litio se representa con un código de tres letras, donde la primera letra, en la mayoría de ocasiones corresponde a la letra L, haciendo referencia al litio, o N, cuando el aleante principal es el níquel, material altamente compatible con varios tipos de baterías; y las otras dos letras varían de acuerdo con los elementos aleantes asociados a la fórmula química característica de cada clase.

Cuadro 1. Tipos Comunes de baterías de ion de litio según composición material de cátodo. Los compuestos marcados con asterisco ya se encuentran obsoletos y no se utilizan más en la industria

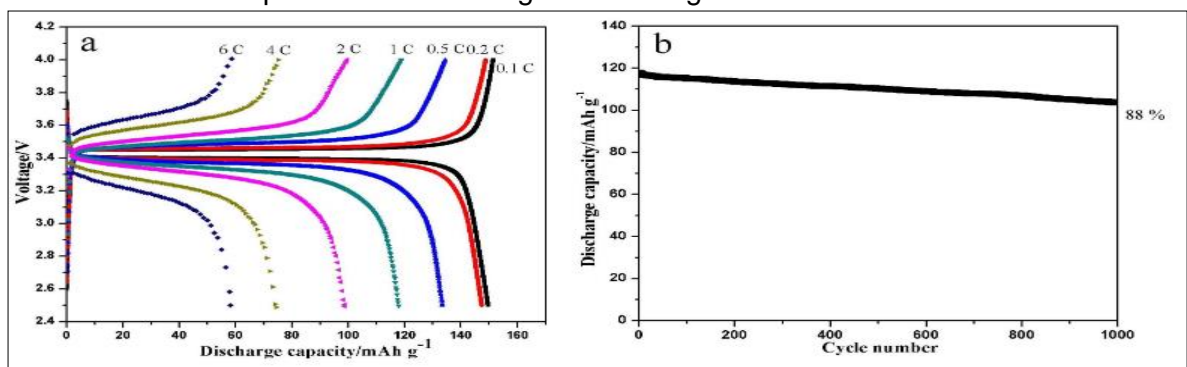
Tipo de Aleante	Fórmula Química	Designación Técnica	Año de Creación	Punto Fuerte	Usos Comunes
Óxido de Cobalto***	LiCoO2	LCO	1991	Energía Específica	Dispositivos Electrónicos
Óxido de Manganeso ***	LiMn2O4	LMO	1996	Energía Específica	Dispositivos Médicos
Óxido de Níquel, Cobalto y Manganeso	LiNiMnCoO2	NMC	2008	Propiedades Balanceadas	Bicicletas Eléctricas y Equipos de Baja Potencia
Fosfato de Hierro	LiFePO4	LFP	1996	Potencia y Vida Útil	Motores Eléctricos y Fuentes de Poder
Óxido de Níquel, Cobalto y Aluminio	LiNiCoAlO2	NCA	1999	Energía Específica	Motores Eléctricos (Panasonic) Industrial
Titanato de Litio	Li2TiO3	LTO	2008	Performance y Seguridad	Motores Eléctricos de Baja Potencia

Fuente: elaboración propia con, base en: CADEX ELECTRONICS INC. BU-205: Types of Lithium-ion Batteries. Jul 7. [Consultado el Aug 8; 2.019] Disponible en: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

Debido al incremento de la popularidad de estos dispositivos, se han iniciado investigaciones acerca de otros tipos de baterías, entre los cuales se encuentran las Litio-Aire (Li-Air), Litio-Metal (Li-Metal), Litio en estado Sólido, Litio- Sulfuro (Li-S), Iones de Sodio (Na-ion) y Fosfato de Hierro aleado con Manganeso (LMFP). Estas baterías aún están en fase de investigación y desarrollo⁹; por lo tanto, no se espera que estén disponibles al público por el momento, tal vez en un mediano plazo se empiecen a ver los primeros prototipos de esta nueva generación de baterías.

1.2.5 Comportamiento de las baterías de ion de litio. La tasa a la cual las baterías se cargan o descargan, con el fin de determinar su capacidad, es determinada a través de unas condiciones estandarizadas conocidas como parámetro C, el cual consiste en medir el comportamiento de una batería de capacidad 1Ah que debe producir una corriente de 1A por una hora. Con base en este parámetro inicial, se pueden hacer alteraciones para determinar condiciones de desgaste acelerado o menor según la necesidad. Por lo general, las tasas críticas de medición en este parámetro son 20C y C/20, aunque pueden ser mayores o menores según la aplicación deseada. Este parámetro determina el estado de carga y descarga de la batería; también se utiliza para medir el voltaje mínimo que requiere las celdas electroquímicas de la batería para poder utilizar sus propiedades. Si se alcanza un voltaje de un valor inferior al mínimo por celda, la batería queda completamente inservible, ya que ni siquiera existiría la suficiente diferencia de potencial eléctrico para poder ejercer la reacción química utilizada durante el proceso de carga.

Imagen 5. Gráfica de parámetro C de carga y descarga para batería de compuesto LiFePO₄ con su respectiva curva de degradación según el número de ciclos



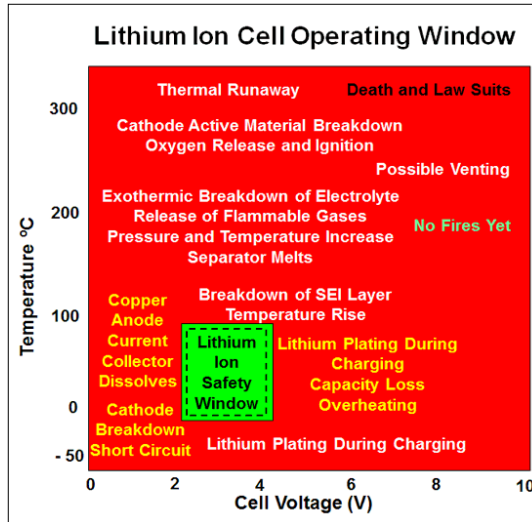
Fuente: ZHANG, Jianjun, *et al.* Taichi-inspired rigid-flexible coupling cellulose-supported solid polymer electrolyte for high-performance lithium batteries. 2014. 6272 p.

⁹ CADEX ELECTRONICS INC. BU-212: Types of Lithium-ion Batteries. Jun 20, [Consultado el Aug 8; 2.019] Disponible en: https://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries

1.2.6 Comportamiento en estado crítico. Las baterías de ión de litio suelen presentar inestabilidad en ciertos rangos de temperatura, en especial cuando se emplean en climas extremos, tanto fríos como calurosos. Cuando las temperaturas son inferiores a los 0°C, las baterías no pueden generar potencia debido a la pobre reacción química que ocurre a esa escala de temperaturas, añadido a la posible solidificación del litio durante la fase de carga, en especial en la zona del ánodo; la “zona segura” a la cual la integridad de la batería se encuentra fuera de peligro se ubica cerca de los 15°C de acuerdo con sus respectivas propiedades físicas y químicas, aunque la generación de potencia aumenta hasta su máximo en temperaturas cercanas a los 20°C, la cual se mantiene hasta alcanzar temperaturas entre 40°C y 60°C dependiendo del compuesto químico de la fuente de poder. A partir de temperaturas mayores, dependiendo de la formulación química de la batería, se empiezan a presentar las famosas pérdidas de potencia por sobrecalentamiento, ocasionando la pérdida de funcionamiento de las baterías y un aceleramiento en el proceso de degradación de las mismas por la exagerada disipación de calor. A temperaturas mayores a 100°C, los componentes físicos empiezan a sufrir derretimiento, como el caso del separador y el cátodo, asimismo incrementando el peligro de un cortocircuito el cual ocasionaría explosiones de gran magnitud en el peor de los casos, producto de la liberación de oxígeno causada por la rotura del cátodo y la propagación de la explosión a través del electrolito sobrecalentado¹⁰. Este comportamiento es bastante similar a una curva de esfuerzo y deformación en un material, por tal motivo, se debe buscar mantener el sistema en un rango apropiado de temperatura para mantener las propiedades en la mejor forma posible, extendiendo el ciclo de vida y garantizando la mejor curva de rendimiento.

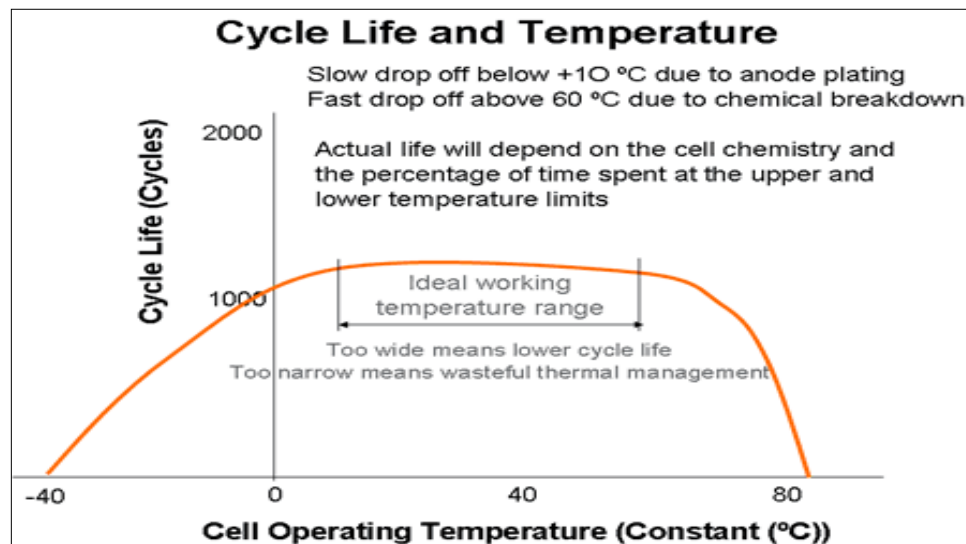
¹⁰ WOODBANK COMMUNICATIONS LTD. Lithium Battery Failures _ Electropaedia. [Consultado el Feb 22,2019]. Disponible en: https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm

Imagen 6. Rango de operación de las Baterías de litio a nivel general



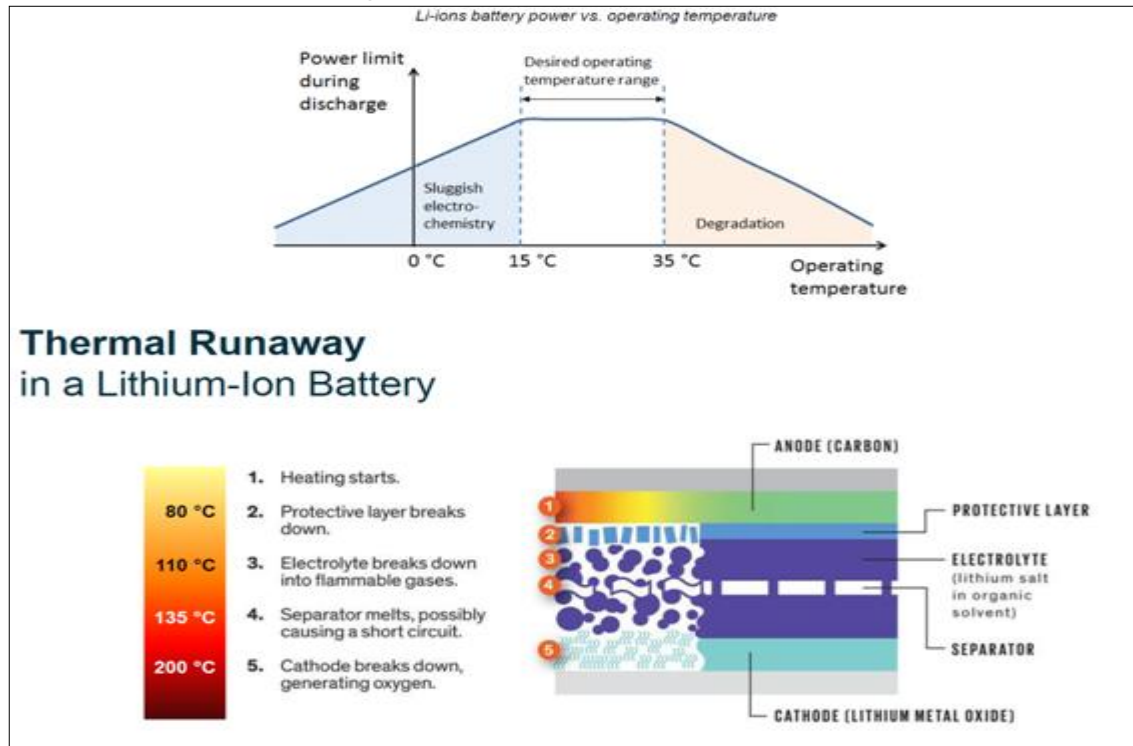
Fuente: HE, Dandan. Effect of Radiation On the Morphology of Lithium-ion Battery Cathodes. The Ohio State University / OhioLINK, 2014.

Imagen 7. Perfil de temperaturas de rango ideal teórico en una batería De ion de litio



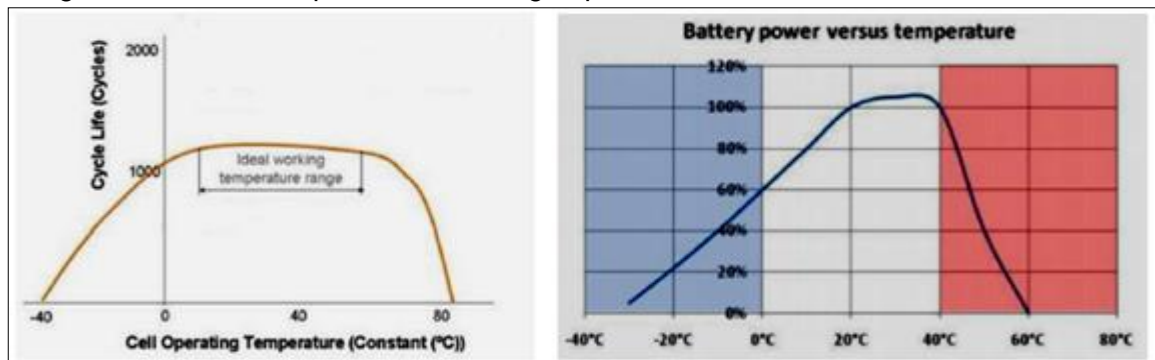
Fuente: SEPASI, Saeed. Adaptive state of charge estimation for battery Packs. 2014.

Imagen 8. Descripción gráfica del comportamiento de una batería de ion de litio a Condiciones críticas de temperatura



Fuente: BIZZARRI, Alessandro. Thermal management for batteries in E-mobility Applications. En: 1931 Congressentrum den Bosch. (14 Jun, 2018). Jun 14, 2018. p. 7-8

Imagen 9. Perfil de temperaturas de rango óptimo en una batería de ion de litio



Fuente: WICKRAMARATNE, Lahiru. BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM (Formula Student). 2017

1.3 VEHÍCULOS TIPO GO-KART

Los vehículos tipo go-kart, más conocidos como go-karts o simplemente karts, de acuerdo con la Federación internacional de automovilismo FIA son: "Vehículos de tipo monoplaza que carecen de techo o cabina, sin suspensión y pueden o no

tener elementos de carrocería; tienen cuatro ruedas no alineadas, de las cuales las dos ruedas delanteras deben dar la dirección y las dos traseras deben transmitir la potencia y estar conectadas a un eje sólido.”¹¹

Imagen 10. Kart de competición de la marca Sodikart, uno de Los fabricantes más grandes del sector



Fuente: KARTINGDUBAI.COM. SodiKart Middle East.
[Consultado el Ene 10, 2019] Disponible en:
<http://www.kartingdubai.com/uae-kart-racing/race-teams/sodikart-middle-east>

1.3.1 Breve reseña histórica. Los karts se originaron a finales de los años 50 del siglo pasado en los Estados Unidos, de la mano de los ingenieros Art Ingels y Lou Borelli. El primer kart fue construido a base de un chasis tubular de un avión en desuso y un motor de cortacésped West Bend de dos tiempos. El nuevo invento fue corrido en principio en el autódromo de Pomona, estado de California, después masificándose en el estacionamiento del estadio Rose Bowl, ubicado en la ciudad de Pasadena; a partir de ese momento, el fenómeno del kart se empieza a expandir a nivel mundial.

En los años 60, el karting se empieza a establecer como disciplina deportiva con su llegada a Europa, iniciando en Italia, y la creación de la comisión internacional del karting (CIK) siendo el principal ente regulador de este deporte con sede en Francia. A partir de la década de los 70, el kartismo se convierte en el paso previo y complemento para reconocidos pilotos de diversas categorías en el automovilismo hasta la actualidad.¹²

¹¹ CIK- FIA. Règlement Technique Pour Les Karts Electriques (E-Karting).

¹² CIK-FIA: Our history. [Consultado el Ene 11,2019]. Disponible en: <http://www.cikfia.com/inside-cikfia/history/our-history.html>

La adopción de la energía eléctrica como forma de propulsión para esta clase de vehículos se empezó a implementar a principios de los años 2.000, con el uso de baterías tradicionales de ácido y plomo, popularizando las pistas indoor, hasta llegar a las baterías de ion de litio en la actualidad, evitando los problemas característicos causados por el uso de motores de combustión. A nivel profesional, los karts eléctricos apenas se están empezando a introducir en categorías mini, cadete y junior. El primer campeonato profesional de karts eléctricos se presentó en Latvia en el año 2.018¹³

1.3.2 Componentes básicos. Los vehículos tipo go-kart tienen una serie de componentes que son comunes y que están sujetos a homologación por parte de la FIA y la comisión internacional de karting (CIK), variando de categoría en categoría. Para esta ocasión. Los elementos que debe tener un vehículo tipo go-kart son los siguientes.

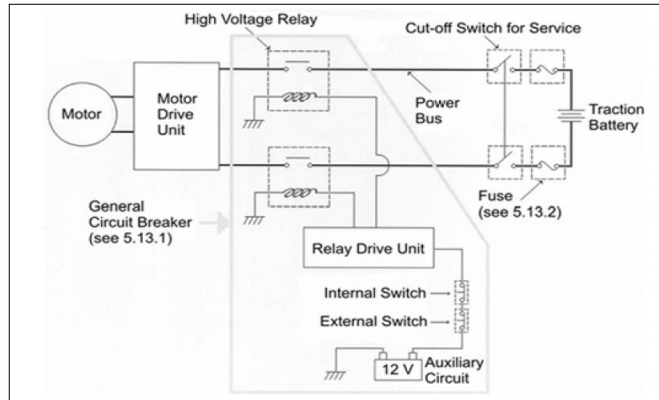
1.3.2.1 Chasis. Es el elemento base del kart y el componente más crítico, el cual recibe todas las fuerzas implicadas en su respectivo funcionamiento. Es fabricado en metal por razones de reglamento y homologación, por lo general en forma tubular. Los materiales más usados para esta parte son aceros comerciales de alta ductilidad.

1.3.2.2 Tren Motor. Consta del motor, ya sea de combustión interna o de tipo eléctrico, por lo general y elementos de transmisión de potencia; los cuales suelen ser conjuntos cadena-sprocket y cajas de cambios en los motores de combustión interna y correas si el tren propulsor es eléctrico, aunque eso no se determina por el tipo de unidad de propulsión del vehículo.

1.3.2.3 Baterías (Solo en karts eléctricos). Las baterías se clasifican por grupo. De acuerdo al reglamento estipulado, el grupo 1 es para baterías de ácido y plomo y el grupo 2 es para baterías de ion de litio, siendo el grupo de énfasis del presente trabajo. Las baterías deben estar localizadas en los costados del kart y pueden ser desmontables.

¹³ SORRIDI EDITORE S.R.L.,Tkart. World's first electric Kart Championship launched in Latvia. [Consultado el Oct 1,2018]. Disponible en: <https://www.tkart.it/en/features/worlds-first-electric-kart-championship-launched-in-latvia/>

Imagen 11. Esquemático del funcionamiento de Baterías de ión de litio en un kart eléctrico



Fuente: CIK- FIA. Règlement Technique Pour Les Karts Electriques (E-Karting). p. 40

1.3.2.4 Ruedas. Las ruedas varían su tamaño dependiendo de la categoría y el uso del kart. Las delanteras no deben estar alineadas, ya que no se permite el uso de suspensión, las ruedas traseras deben de estar unidas por un eje rígido por reglamento, sin importar el tipo de propulsión del kart.

1.3.2.5 Mecanismo de dirección. Consta de un mecanismo basado en los parámetros geométricos de Ackerman, mediante el uso de tubos rígidos metálicos de acero o aluminio, cuyo grosor mínimo es de 1.8 milímetros; cualquier tipo de asistencia mecánica o hidráulica está prohibida por reglamento, además que es innecesaria, debido a la esencia de esta clase de vehículos.

1.3.2.6 Otros componentes. En este grupo se encuentran frenos, sillas, pedales, partes de carrocería, entre otros.

Imagen 12. Kart eléctrico BSR 02 de 25kW



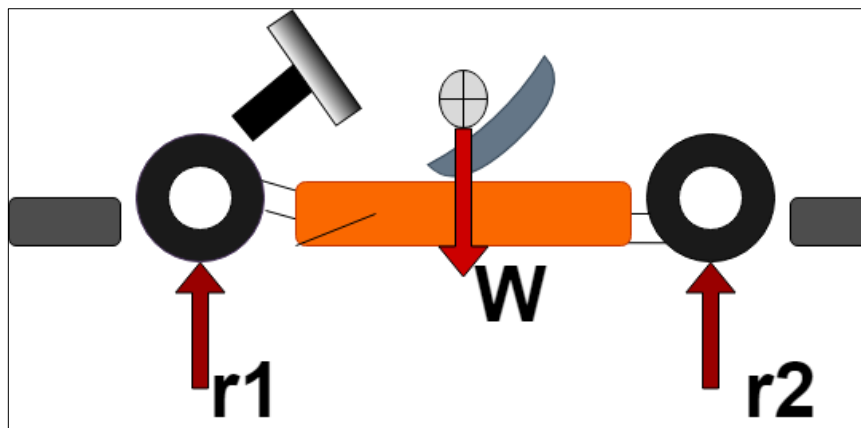
Fuente: BLUE SHOCK RACE. [Consultado el Feb 12,2019].
Disponible en: <http://blueshockrace.com/championship/>

1.4 COMPORTAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS GO-KART

Los vehículos tipo go-kart presentan exactamente los mismos comportamientos a nivel estático y dinámico que un automóvil convencional, donde el análisis de fuerzas presenta ciertas simplificaciones de acuerdo al caso a estudiar, ya que los valores correspondientes a las cargas son bastante inferiores en los concerniente a los dos tipos de vehículos y al respectivo uso que estos tienen, el cual es diferente entre ambos medios. Ciertas cargas como la carga aerodinámica se suprimen, ya que representa un valor mínimo a nivel numérico, y no hace parte del propósito misional de esta clase de vehículos, los cuales están pensados para el aprendizaje de las bases de la conducción deportiva de vehículos de cuatro o más ruedas.

1.4.1 Comportamiento en caso estático. Para este caso, se tienen en cuenta únicamente los casos donde el kart se encuentra quieto o a velocidad constante en línea recta. El sistema de fuerzas que actúa de forma directa sobre éste es el peso y su respectiva normal, más las reacciones de las ruedas con respecto al suelo, cuyo comportamiento es igual al de un apoyo simple. El análisis de esta condición se suele dar con la presunción de un suelo en terreno llano, ya que los planos inclinados son poco existentes en la gran mayoría de kartódromos tanto a nivel profesional como recreativo a nivel mundial. Aunque se considera una pendiente máxima del 18% como máximo admisible, debido a que ciertos escenarios como el Atlanta Motorsports Park presenta muchos cambios de elevación en todo el trazado del circuito. La sumatoria total de fuerzas en este caso es igual a cero.

Imagen 13. Diagrama de fuerzas correspondiente al caso estático
Del vehículo



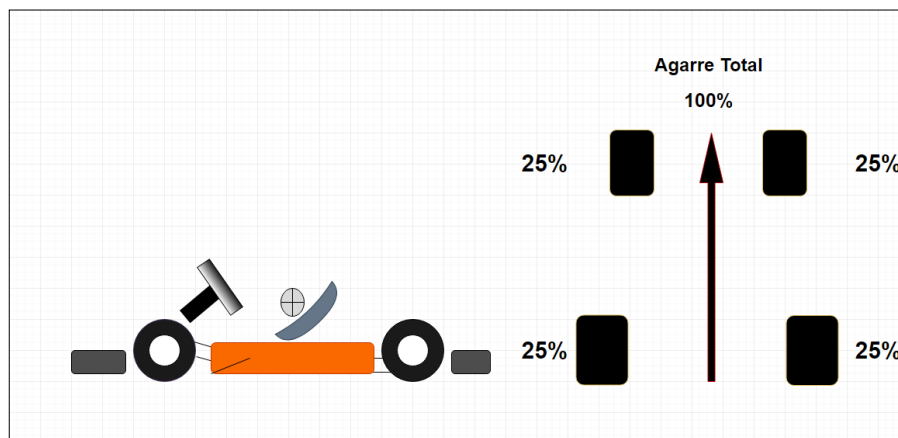
Fuente: elaboración propia.

1.4.1.1 Descripción de fuerzas. Las fuerzas involucradas en este caso se mencionan a continuación.

- **Peso de vehículo (W):** Es el producto de la masa total del kart por la aceleración gravitacional a la cual se somete todo cuerpo en el planeta Tierra. Esta fuerza debe descomponerse en caso que el análisis del vehículo sea en un plano inclinado, cuyo ángulo determina las magnitudes de los vectores resultantes.
- **Reacción de apoyos (r1 y r2):** Las ruedas del vehículo cumplen las funciones de un apoyo tipo patín, el cual tiene una única reacción en el eje vertical, y representa las fuerzas de reacción en los apoyos del kart.

1.4.1.2 Comportamiento de agarre. Bajo esta condición, la distribución de agarre es completamente equitativa entre las cuatro ruedas, y donde el porcentaje de agarre disponible en cada neumático es del 25% y no presenta pérdidas.

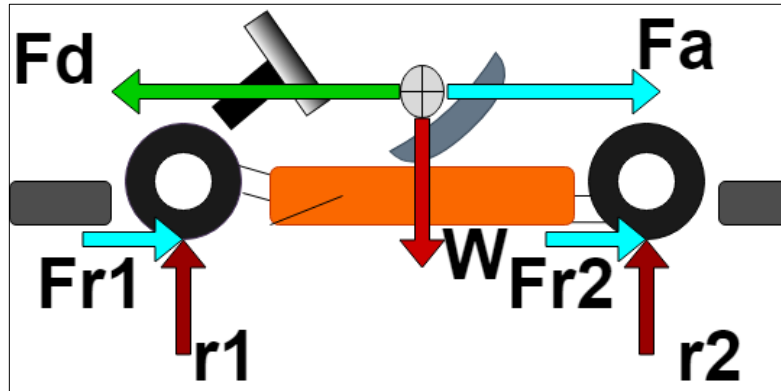
Imagen 14. Comportamiento de agarre en el vehículo en condición Estática



Fuente: elaboración propia con base en MANSELL, Scott.
Understanding weight transfer - Driver's University Video
Tutorial # 4. [Consultado el Feb 18,2019].
Disponible en: <https://driver61.com/uni/weight-transfer/>

1.4.2 Comportamiento en condiciones dinámicas. Este es el caso más común en el cual el vehículo. Cuando éste necesita ponerse en movimiento, se debe desbalancear un par de fuerzas compuestas, las cuales son la fuerza tracción y la fuerza de rodaje.

Imagen 15. Diagrama de cuerpo libre correspondiente al Proceso de inicio del movimiento del kart



Fuente: elaboración propia

Este par de fuerzas se componen de otras sub-fuerzas que deben ser tomadas en cuenta para calcular el total correspondiente. La fuerza de rodadura es el resultado del total de fuerzas opositoras al movimiento rectilíneo, las cuales son la fuerza de arrastre, la resistencia a la rodadura y la resistencia gravitacional.

Las fuerzas involucradas adicionales al caso estático se nombran en seguida.

- **Fuerza de arrastre (Fa):** Fuerza de oposición al movimiento ejercida por el ambiente al vehículo. Se halla de forma experimental dependiendo del cuerpo, y presente una ecuación básica de gobierno.

Ecuación 4. Fuerza de arrastre

$$F_a = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A_f$$

Fuente: BIANCOLINI, Marco Evangelos. Evaluation of Aerodynamic Drag of Go Kart by Means of Coast Down TEST and CFD Analysis. Rome Italy: Tor Vergata University, 2008. p.1-13

Los componentes de la ecuación son:

- ρ : Densidad del aire, medida en kg/m³.
- v : Velocidad del vehículo, medida en m/s.
- C_x : Coeficiente de resistencia aerodinámica, se halla por tablas o de forma experimental.
- A_f : Área frontal de la superficie del vehículo.

- **Fuerza conductora (Fd):** Es la fuerza necesaria para mover el vehículo.
- **Fuerzas de fricción en neumáticos (Fr1 y Fr2):** Son las fuerzas que permiten el agarre del kart con respecto al suelo. La forma de averiguar el valor de esta fuerza se hace por medio de esta expresión.

Ecuación 5. Fórmula de fuerza de rodaje

$$F_{rod} = f_r \times W$$

Fuente: VILA ROMERO; Opcit; p. 15

Donde:

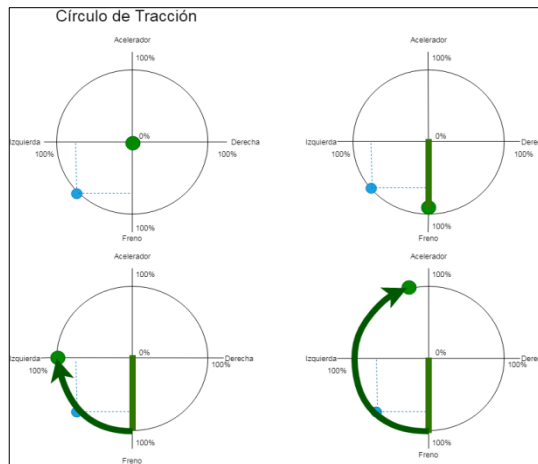
- f_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura. Este coeficiente se halla por tablas o de forma experimental; varía de acuerdo al tamaño del vehículo y al tipo de superficie de rodadura a estudiar.
- W : Peso total del vehículo, medido en Newton.

En ciertos análisis de algunos autores¹⁴ se suprimen algunas de estas fuerzas con el fin de simplificar los cálculos matemáticos, haciendo de este modo una aproximación de la fuerza de fricción de los neumáticos con respecto a la resistencia a la rodadura, la cual es el producto del peso total del vehículo y un factor de resistencia a rodadura, el cual tiende a variar de acuerdo al tipo de vehículo y a la superficie de rodaje.

El comportamiento de cargas en los neumáticos se rige por el círculo de tracción, también conocido como círculo de agarre, el cual estima de forma aproximada el equilibrio dinámico del vehículo.

¹⁴ VILA ROMERO; Opcit; p. 15

Imagen 16. Círculo de tracción con Gráfica de agarre ideal en el proceso teórico de Tomar una curva

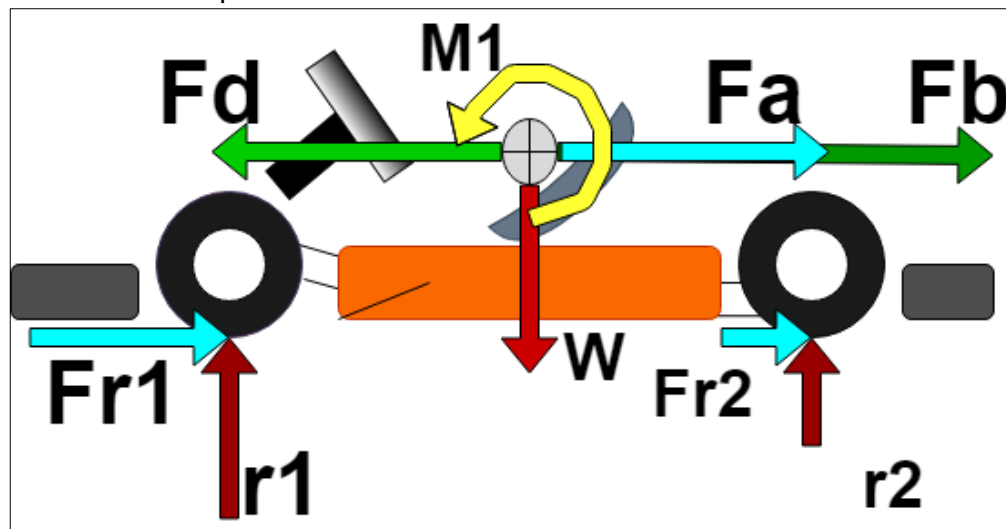


Fuente: Elaboración propia con base en MANSELL, Scott. Understanding Grip – Driver's University Video Tutorial #4. [Consultado el Feb 12,2019]. Disponible en: <https://driver61.com/uni/grip/>

Esta es una forma práctica de entender las fuerzas a las cuales se someten las ruedas de un vehículo y su respectivo comportamiento de acuerdo cada situación de conducción, con el fin de mantener el equilibrio dinámico. La otra variable fundamental para el estudio de comportamiento es la transferencia de masa, la cual es el movimiento del centro de gravedad global del sistema, de acuerdo con las situaciones de conducción del vehículo. De acuerdo a las variables susodichas, se procede a hacer el estudio de las tres situaciones presentes en la conducción de un vehículo tipo go- kart, las cuales son:

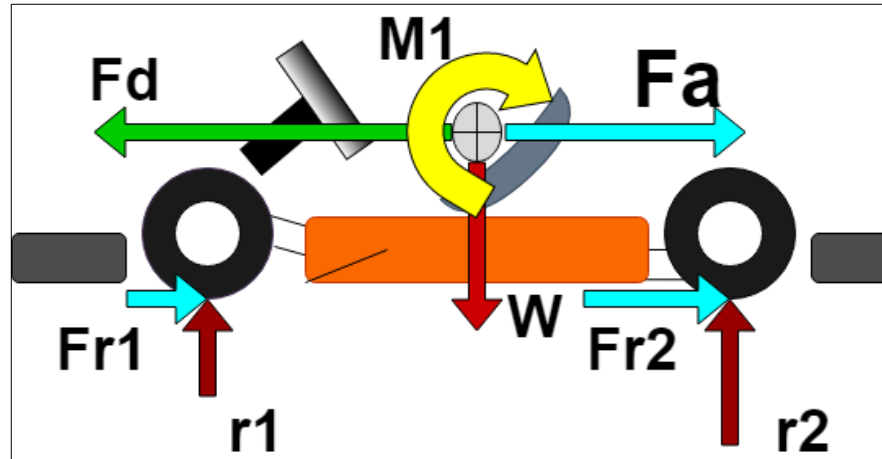
1.4.2.1 Cabeceo (Aceleración/Frenado críticos). Esta situación se da cuando se necesita aumentar, disminuir o parar la velocidad del vehículo. En este comportamiento, las ruedas van a responder única y exclusivamente a la energía transmitida por la unidad de potencia a través de su respectivo sistema de transmisión o la aplicación total de los pedales; en este caso, el acelerador o el freno. Esta situación se presentará mayor carga sobre las ruedas propulsoras en el caso de aceleración y las ruedas delanteras durante el frenado. Esto se debe a la transferencia de peso ocurrida a lo largo del eje longitudinal del kart, ocasionando torque rotacionales a lo largo del mismo, adicionando una pérdida de agarre del 10% por pérdida de contacto de las ruedas con el suelo, producto del torque rotacional del vehículo; esta situación se puede compensar con técnicas más avanzadas de manejo, con el fin de mantener niveles de agarre cercanos al estado estático, dándole prioridad a los neumáticos frontales en caso de frenado y a los traseros en la fase de aceleración, con el fin de obtener la mayor tracción efectiva. Durante estas etapas, el kart va a ser incapaz de girar correctamente debido a que todo el agarre de los neumáticos está en uso, ocasionando trompos y pérdida del control del vehículo.

Imagen 17. Diagrama de Cuerpo Libre del kart durante el proceso de frenado A su máxima capacidad



Fuente: elaboración propia

Imagen 18. Diagrama de Cuerpo Libre del kart durante el Proceso de aceleración a su máxima capacidad



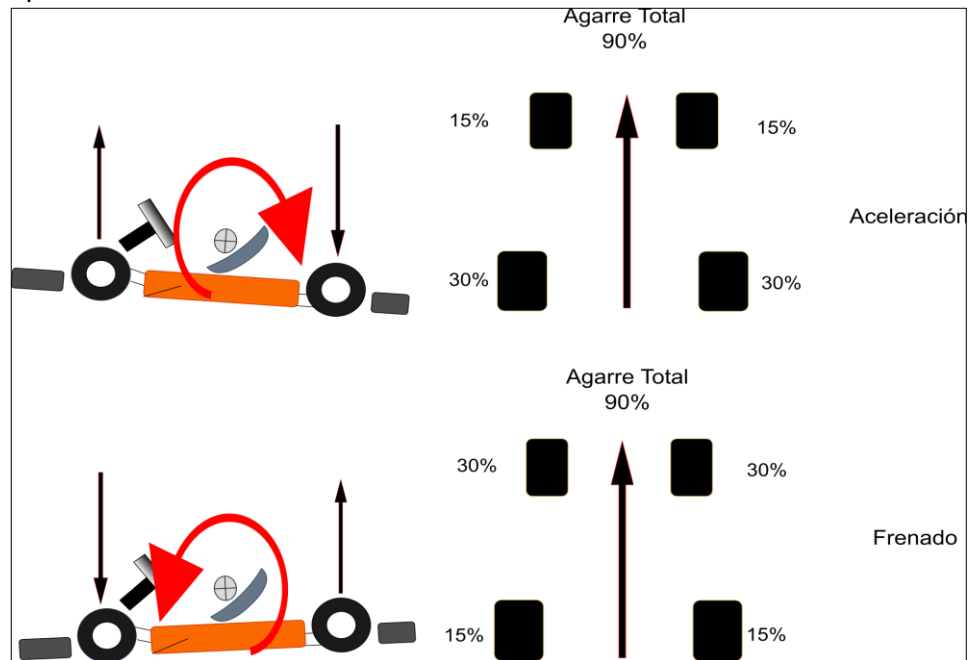
Fuente: elaboración propia.

Las fuerzas adicionales involucradas son:

- **Fuerza de Frenado (Fb):** Esta fuerza es el resultado de la presión aplicada a los frenos del vehículo. Debe ser mayor a la fuerza conductora, con el fin de reducir la velocidad o detener el kart.
- **Momento de reacción (M1):** Producto de la aceleración, tanto positiva como negativa (frenado) producto de la aplicación

Debido a este comportamiento de fuerzas, el agarre disponible total del vehículo durante este movimiento es del 90%, debido a los momentos rotacionales generados. Este fenómeno tiene como consecuencia la pérdida del 10% del agarre total disponible, haciendo que el vehículo se vuelva inestable dinámicamente si se intenta tomar una curva sin una reducción previa de la carga de aceleración o frenado, pero que gane un extra de agarre del 5% por rueda en los neumáticos delanteros (frenado) o traseros (aceleración), el cual se aprovecha de una mejor manera estando en trayectorias rectas.

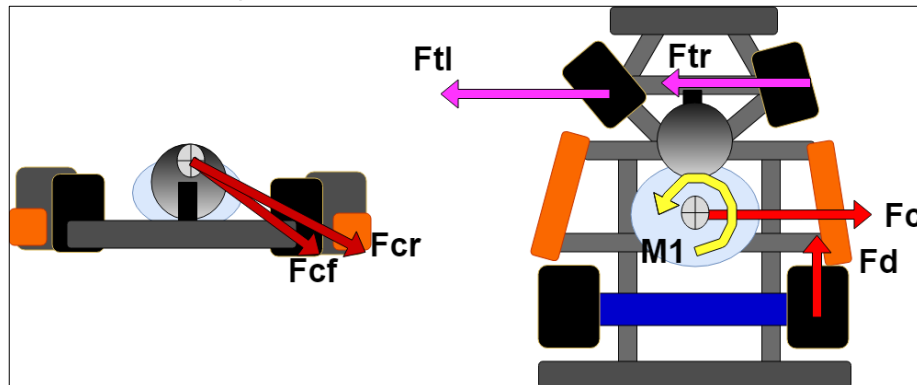
Imagen 19. Comportamiento de agarre y su influencia en las fuerzas aplicadas durante el movimiento de cabeceo



Fuente: elaboración propia con base en MANSELL, Scott. Understanding Weight transfer - Driver's University Video Tutorial #4. [Consultado el Feb 18,2019]. Disponible en: <https://driver61.com/university/weight-transfer/>

1.4.2.2 Balanceo (Curvas). En esta condición, el kart no se verá sometido a las cargas ni de aceleración ni de frenado. Esta condición tiene una duración corta, ya que ocurre únicamente en cuando el kart está en el ápice de la curva, conocido con el nombre técnico de ápex o ápice. La mayor carga lateral ocurre en esta fase, determinado las fuerzas y torques que determinarán la otra parte de la rigidez necesaria de los componentes estructurales para mantener un excelente comportamiento dinámico.

Imagen 20. Fuerzas principales en toma de curva; en este caso, tomar una curva a la izquierda



Fuente: elaboración propia

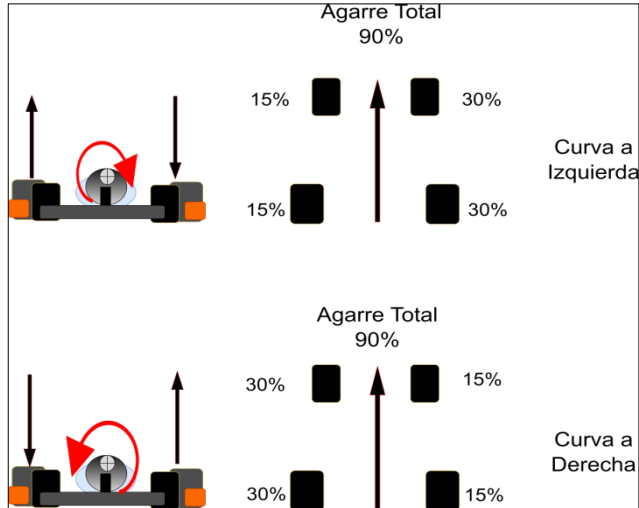
Las fuerzas principales en esta fase son:

- **Fuerza centrípeta (F_c):** la cual es la fuerza que el suelo le impone a las ruedas y el momento polar de inercia, el cual es la resistencia de un cuerpo a rotar sobre su propio eje.
- **Fuerza Conductor (F_d):** Fuerza que propulsa al vehículo durante el movimiento. Se halla mediante la solución del diagrama de fuerzas por lo general.
- **Fuerza de curva (F_{tl} y F_{tr}):** Fuerza de fricción de los neumáticos con respecto al radio de curva.
- **Momento de inercia (M_1):** Rotación del vehículo sobre su propio centro de gravedad, el cual le permite rotar sobre su propio eje.

Por motivos de simplificación del análisis dinámico, se asume que una de las ruedas trasera está en el aire¹⁵ para facilitar el tratamiento a nivel matemático. Debido a este comportamiento presente en el vehículo en esta fase del movimiento, se presenta una pérdida de agarre total del 10%. Por esta razón, es necesario ser bastante diligente con el suministro de potencia y aplicarlo de forma progresiva de acuerdo a la situación.

¹⁵ HUGHES, James. Technical Section Kart Steering Setup and Theory Article – Black Sheep Racing. [Consultado el Feb 8, 2019]. Disponible en: https://www.blacksheepacing.com/Technical_Steering2.htm

Imagen 21. Agarre en curvas

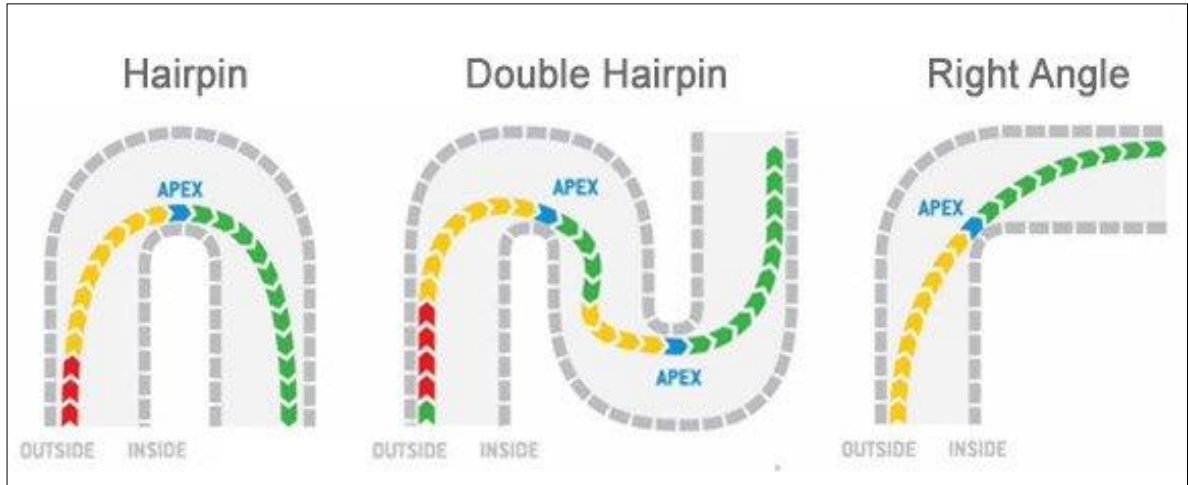


Fuente: elaboración propia con base en MANSELL, Scott. Understanding weight transfer – Driver's University Video Tutorial #4. [Consultado el Feb 18, 2019].

Disponible en: <https://driver61.com/uni/weight-transfer/>

1.4.3 Condiciones de manejo real. La combinación de ambos fenómenos representa las condiciones de uso real del vehículo, y como consecuencia del uso de técnicas avanzadas de manejo en competición. Los dos grandes tipos de escenarios en los cuales un kart es utilizado son kartódromos y pistas indoor; las cuales se caracterizan por su gran cantidad de curvas y trazados complejos, en los cuales se aplican los casos descritos con anterioridad. El sistema de gestión térmica a diseñar debe de ser capaz de soportar este tipo de condiciones, el cual puede involucrar movimientos bruscos en una considerable cantidad de casos, debido a que sus componentes pueden alterar las inercias del vehículo, haciendo que ciertos pilotos deban adaptar su estilo de conducción a este conjunto de elementos destinados a gestionar la temperatura de la fuente de alimentación.

Imagen 22. Trayectoria ideal de diversos tipos de curva



Fuente: GO-KART-SOURCE.COM.10 Go Kart Cornering Tips for Faster Racing Laps. [Consultado el Feb 12,2019]. Disponible en: <http://go-kart-source.com/go-kart-cornering/>

Imagen 23. Kartódromo de Sarno, Italia. Uno de las pistas más reconocidas del mundo, sede campeonatos de renombre internacional



Fuente: ALVAREZ, Guillaume. FIA Karting: Two European titles at stake in Sarno. Jun 12,. [Consultado el Sep 2,2019]. Disponible en: <https://theracebox.com/fia-karting-two-european-titles-at-stake-in-sarno/>

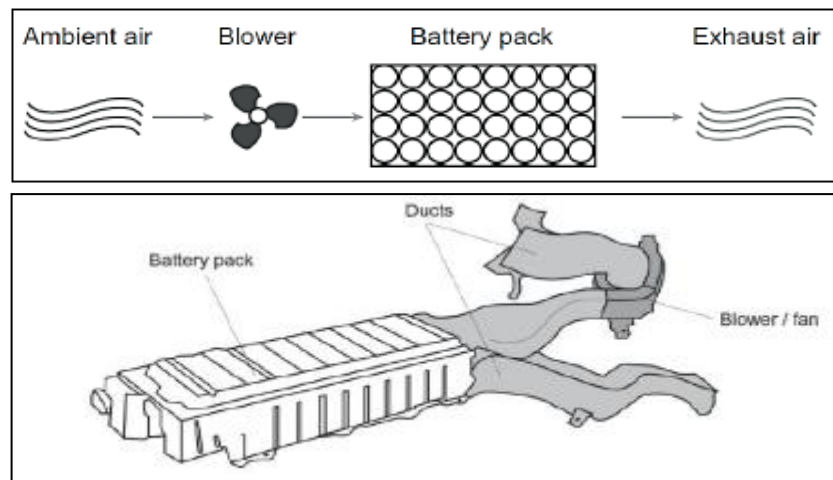
Teniendo en cuenta estos fenómenos, los cuales varían según el entorno de uso y sus respectivas condiciones ambientales, se pueden obtener las fuerzas máximas y mínimas que el chasis del kart necesita para tener un comportamiento estable, enfatizando en las condiciones más críticas que se pueden llegar a presentar. Las fuerzas relativas a impacto o deformaciones mínimas tolerables en caso de accidente requerirán un análisis específico de los componentes estructurales de esta clase de vehículos, el cual no hace parte de los objetivos de este trabajo.

1.5 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Un sistema de refrigeración es un conjunto de elementos mecánicos y electrónicos cuyo fin es el mantener la temperatura óptima de funcionamiento de un sistema en particular. Para este caso, se va a tomar la definición de sistema de refrigeración utilizado en automóviles, en especial eléctricos, los cuales poseen diferentes componentes de acuerdo al método de convección forzada a utilizar para la refrigeración de las fuentes de potencia, cuyo aumento de temperatura se da por sus condiciones normales de funcionamiento, con cierta influencia del ambiente de operación. Por lo general, estos sistemas se dividen en dos mega-grupos que engloban todos los diseños posibles.

1.5.1 Convección forzada por aire. Estos sistemas de refrigeración son los más simples en existencia, debido a que se apoyan en ventiladores y ductos de canalización que impulsan el aire ambiente a los compartimientos donde se encuentran las baterías de tracción del vehículo. Este método de refrigeración es muy popular para pilas pequeñas o que operan con gran flujo de aire circundante.

Imagen 24. Sistema de refrigeración de baterías usando aire en Automóvil híbrido Toyota Prius



Fuente: WICKRAMARATNE, Lahiru. BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM (Formula Student). 2017.

La refrigeración por aire es la forma más económica de mantener las fuentes de poder con una temperatura controlada; por eso es que es usada en vehículos como el Nissan LEAF para mantener bajos los costos de producción, los cuales tienden a ser altos por el momento; aunque esta forma de refrigeración es mucho más efectiva cuando las celdas de las baterías están en alineación cruzada¹⁶,

¹⁶ AN Zhoujian JIA Li DING Yong DANG Chao LI Xuejiao. Opcit; p. 396

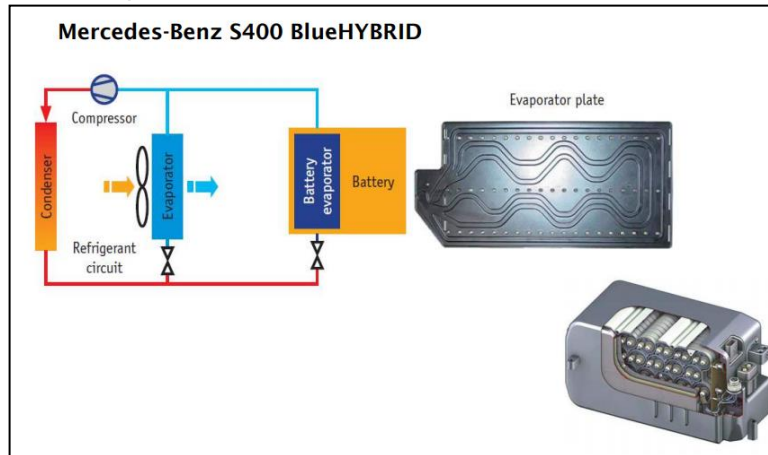
aunque requiere de un caudal de aire considerable para obtener una refrigeración eficiente, en especial si se trata de baterías con gran cantidad de celdas electroquímicas; las principales desventajas de este método se componen de la baja capacidad calorífica del aire, sin contar con las posibles impurezas que este pueda tener, ya sea polvo, residuos o similares. Este sistema también se le conoce con el nombre de sistema pasivo de aire.¹⁷ Existe una contraparte a este método conocida como sistema activo del aire, pero no será tenido en cuenta ya que usa sistemas de aire acondicionado, los cuales no están presentes en los vehículos tipo go-kart.

1.5.2 Refrigeración líquida. Este es el sistema de refrigeración más completo que existe en la actualidad, y es mucho más eficiente que su contraparte de aire, siendo el más usado para los nuevos desarrollos y modelos más sofisticados de automóviles eléctricos en el mercado. La refrigeración líquida cuenta con una mayor capacidad calorífica, haciendo posible el manejo de mayores diferenciales de temperatura y mayores tasas de descarga; así mismo, disminuyendo la degradación progresiva que sufren las baterías de forma natural debido al uso dado según las necesidades. Otra de las grandes ventajas de este sistema es la capacidad de trabajo en sistemas aislados, los cuales son más usados con fuentes de poder cuyo voltaje de operación es mayor a 48 volts. En comparación con sus contrapartes de refrigeración por aire, estos son mucho más complejos, pero si se diseñan de forma correcta, no llegarán a generar problemas de espacio en los sitios donde éstos sean requeridos, lo cual varía según la necesidad a ser satisfecha. Los dos tipos de refrigeración líquida más comunes se clasifican en dos grupos: Refrigeración directa e indirecta.

1.5.2.1 Refrigeración directa. En la refrigeración directa, las baterías se encuentran en contacto directo con el fluido de trabajo. Se suelen usar placas conductoras conocidas como chill plates para hacer circular el refrigerante a través de un circuito de refrigeración convencional, con su respectiva bomba, evaporador condensador, compresor, radiadores, entre otros componentes característicos; aunque es importante destacar que esta forma de refrigeración se usan en baterías pequeñas, ya que no es muy eficiente en grandes superficies, como en el caso de vehículos híbridos y ciertos eléctricos de tamaño pequeño, tales como el BMW i3 y el Chevrolet Bolt.

¹⁷ WICKRAMARATNE, Lahiru. BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM (Formula Student). 2017.

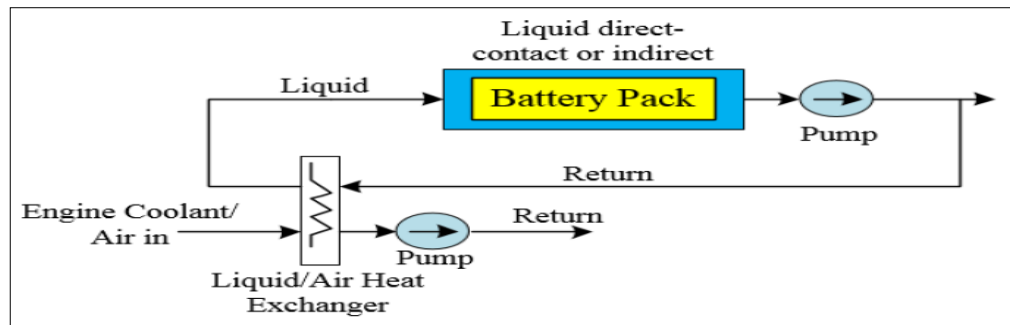
Imagen 25. Chill Plate empleado para refrigeración de Baterías para modelo Mercedes-Benz S400 Híbrido



Fuente: OMAR, Noshin. Next Generation Battery Technologies & Thermal Management for BEVs. 2018

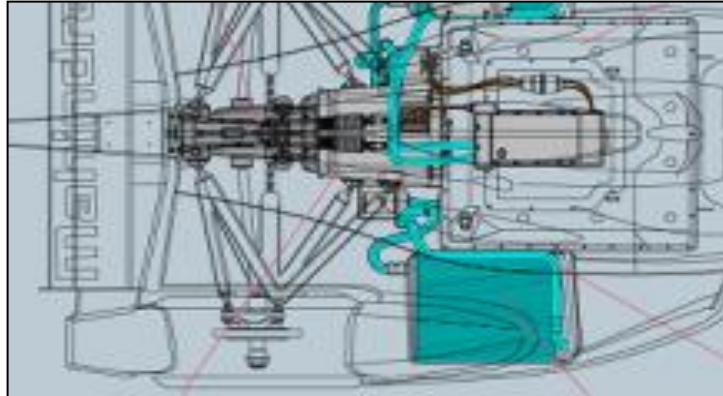
1.5.2.2 Refrigeración indirecta. La sustancia refrigerante no se encuentra en contacto directo con las baterías. Por lo tanto, el calor se transfiere mediante conducción a través de las paredes de la medio que contiene el líquido hacia las fuentes de poder. Esta forma de refrigeración funciona con radiadores y circuitos cerrados convencionales de refrigeración. Actualmente, este sistema es considerado el más eficiente y usado en vehículos de media y alta gama, incluyendo vehículos de competición como los monoplazas del campeonato fórmula E. Uno de los modelos profesionales de kart eléctricos, el letón Blue Shock Race BSR-02 también usa esta clase de refrigeración, siendo una de las más acordes para ámbitos de competencia, también siendo respaldada por el reglamento técnico de la FIA.

Imagen 26. Vista esquemática de un sistema de refrigeración líquida Indirecta



Fuente: SAIF, Mehrdad and SAMADI, M. F. Integrated Battery Management System. En: DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, UNIVERSITY OF WINDSOR. Dec 03, .p. 187

Imagen 27. Refrigeración líquida indirecta aplicada
A un vehículo de formula E



Fuente: Keeping Cool- Current-e. [Consultado el Feb 12, 2019] Disponible en: <https://current-e.com/blueprints/keeping-cool/>

1.5.3 Sistema de refrigeración por materiales en cambio de fase. Debido al estado de evolución constante en el estudio del comportamiento de las baterías de ion de litio, se han empezado a desarrollar métodos de gestión térmica alternativos aparte de los ya tradicionalmente conocidos de convección forzada de aire y la refrigeración líquida. Investigadores de la Universidad de Jiaotong¹⁸, ubicada en Beijing, China, donde están analizando un método de gestión mediante el uso de materiales en cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés), como forma pasiva de enfriamiento, usando materiales como cera parafínica o sales hidratadas, con bajo punto de fusión pero alto calor latente. Con estas formas alternativas, se busca disminuir espacio destinado para el sistema, el evitar corrientes parásitas y un costo bajo. El uso de estos materiales aún se encuentra en fase de experimentación, debido a los grandes deltas de temperatura que aún se presentan a la hora de enfriar baterías.

¹⁸ AN Zhoujian JIA Li DING Yong DANG Chao LI Xuejiao. Opcit; p. 397-398

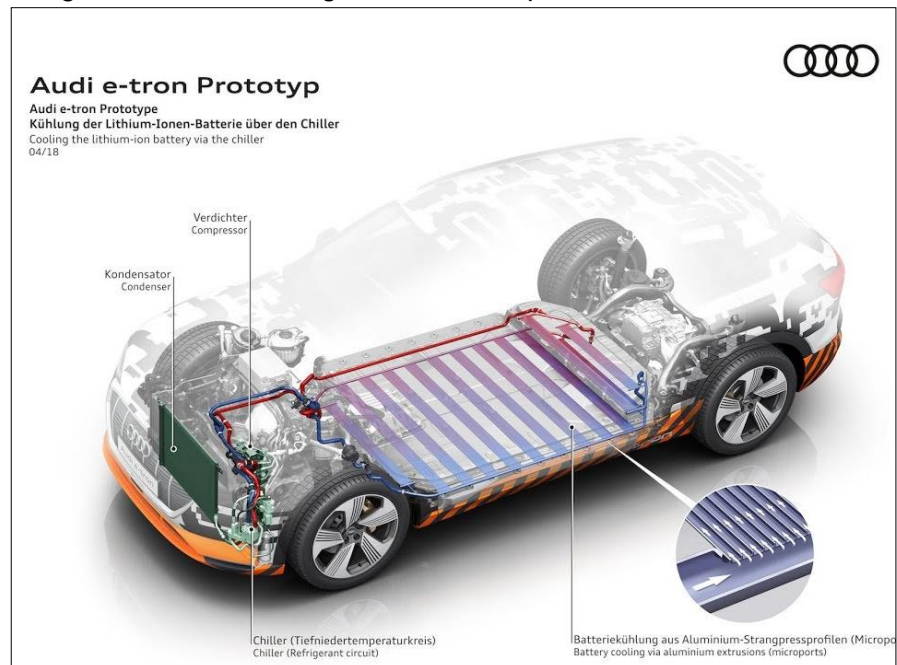
2. SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA

En la presente unidad, se tratará el marco conceptual correspondiente a un sistema de gestión térmica, el cual es necesario para mantener el correcto funcionamiento de las baterías del vehículo a estudiar.

2.1 DEFINICIÓN

Un sistema de gestión térmica es un conjunto de elementos interconectados, los cuales cumplen la función de controlar las variables que afectan la temperatura a la cual se va a desempeñar un equipo en específico.

Imagen 28. Sistema de gestión térmica para vehículo Audi e-tron



Fuente: SLASHGEAR. Audi e-tron 95 kWh thermal management system. [Consultado el Aug 19, 2019]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=jnRljGDUdes>

2.2 FUNCIONES DE UN SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA

Este tipo de sistemas puede ejercer varias funciones de acuerdo con el tipo de aplicación, debido a que estos sistemas se suelen hacer a la medida de una situación a resolver, la cual debe estar claramente definida. Las funciones más comunes son mencionadas a continuación.

2.2.1 Enfriamiento. Consiste en reducir la temperatura del equipo a trabajar; en este caso, para contrarrestar la temperatura generada por la disipación de calor de las baterías, con el fin de mantenerlas en el rango correcto de temperatura de trabajo.¹⁹

2.2.2 Calentamiento. En cierta clase de ambientes, las bajas temperaturas no permiten el funcionamiento apropiado del equipo; por lo tanto, es necesario que el sistema de gestión térmica active ciertos componentes de calefacción para alcanzar las temperaturas de operación en un intervalo de tiempo deseado.²⁰ Para el presente proyecto no se necesita aplicar esta función, ya que el ambiente en el cual se desarrolla éste no genera problemas por temperaturas bajas que afecten el funcionamiento del set de baterías.

2.2.3 Aislamiento. En condiciones extremas ambientales, tales como climas desérticos o regiones árticas, las diferencias astronómicas de temperatura generan un impacto negativo en el funcionamiento del equipo a administrar, ya que estos picos alteran de una forma importante el funcionamiento normal de éste. Por tal razón, el sistema debe estar aislado de las condiciones externas si se presenta esta variable en la operación.²¹ Para el presente proyecto, la mayor precaución en temas de aislamiento se da con los componentes eléctricos, ya que si se manejan voltajes superiores a cierto valor, se deben aislar esos elementos por razones de seguridad.

2.2.4 Ventilación. Es una de las funciones más importantes del sistema, en especial cuando se están trabajando con materiales tóxicos, o que representan un riesgo para la operación normal del equipo.²² La aplicación de esta función puede variar según el tipo de sistema de gestión térmica a usar.

2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA

Los sistemas de gestión térmica se clasifican según el tipo de enfriamiento ejecutado y el control de las variables de gestión de temperatura. Se clasifican en dos sub-tipos, los cuales son de gestión activa y pasiva.

¹⁹ LI, Jiling and ZHU, Zhen. Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. Chalmers University of Technology, 2014. p. 13.

²⁰ Íbid; p.13

²¹ Íbid; p.13

²² Íbid; p.13

2.3.1 Sistemas de gestión activa. Son sistemas cuya totalidad de variables de gestión son completamente controladas por el mismo. Suelen usar evaporadores o sistemas de recuperación de energía, junto con sistemas alternativos de gestión como acoples termoeléctricos o distintas aleaciones de materiales.²³

2.3.2 Sistemas de gestión pasiva. Son sistemas que cuentan con una o más variables de gestión que son controladas por condiciones externas tales como convección natural o exposición al ambiente.

2.4 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA BASADOS EN FLUIDOS

Los sistemas de gestión térmica tienen ciertos elementos en común, sin importar la tecnología con la cual se va a diseñar. Estos ítems serán descritos a continuación.

2.4.1 Medio térmico. Este es el medio por el cual se va a controlar el flujo de calor de forma física en el equipo a trabajar. El medio térmico se divide en dos grupos los cuales son:

2.4.1.1 Aire. Fluido gaseoso presente en la atmósfera del planeta Tierra, cuya composición aproximada es de 78,08% Nitrógeno, 20,95% Oxígeno, 0,93% Argón, y 0,04% varios gases²⁴. Los sistemas de gestión térmica basados en aire son los más comunes y sencillos, ya que este fluido es de disponibilidad ilimitada y su circulación posee propiedades de refrigeración hasta cierto punto. Las desventajas principales con el uso del aire para la gestión térmica es la susceptibilidad de éste a las condiciones ambientales, trayendo posibles contaminantes como polvo y residuos de gases tóxicos, y a su pobre rendimiento cuando se requieren trabajar diferenciales considerables de temperatura.

²³ KAWA, Michael J. Fundamentals of active vs. passive thermal management. Nov 7, [Consultado el Aug 20, 2019]. Disponible en: https://www.electronicproducts.com/Thermal_Management/Heat_Sinks_and_Thermal_Materials/Fundamentals_of_active_vs_passive_thermal_management.aspx

²⁴ Engineering ToolBox. Air - Composition and Molecular Weight. [Consultado el 4 Sep. 2019]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html

2.4.1.2 Fluidos incompresibles (Líquidos). El uso de fluidos líquidos presenta un mejor manejo de grandes diferenciales de temperatura, debido a su mayor capacidad calorífica, mantenimiento de las propiedades, y mejor estabilidad con respecto al ambiente, ya que operan mediante sistemas de lazo cerrado y la solución refrigerante se puede mantener aislada de las condiciones ambiente. Los líquidos más usados para la gestión térmica van desde el agua, pasando por soluciones dieléctricas, hasta aceites y refrigerantes basados en alcohol, como el caso del etilenglicol, y las posibles combinaciones entre fluidos.

2.4.1.3 Medio Mixto. Es la combinación de dos o más mecanismos para efectuar el proceso de gestión térmica. Puede incluir la combinación de tipos de fluidos o asistencia de otro tipo de tecnologías, tales como materiales PCM o arreglos de tipo termoeléctrico.

2.4.2 Medio impulsor de fluido. En caso de que se tenga un fluido como medio térmico principal, se necesita un mecanismo que lo pueda impulsar para poder cumplir con su cometido de la forma más apropiada. Se dividen en los siguientes aparatos.

2.4.2.1 Ventiladores. Dispositivos eléctricos que impulsan el aire para efectuar el proceso de enfriamiento. Estos aparatos son de vital importancia en sistemas que usan aire, debido al gran caudal necesario para ejercer la labor de gestión, dado el bajo coeficiente de transferencia de calor de esta sustancia.

2.4.2.2 Bomba Hidráulica. Dispositivo usado para el transporte de fluidos, mayoritariamente incompresibles, de un lugar a otro. Este elemento es usado en sistemas de gestión térmica que usan líquidos, transportando el fluido de enfriamiento o calentamiento a través de todo el lazo del sistema, desde el tanque de almacenamiento, pasando por los intercambiadores de calor, hasta el componente a gestionar. Este proceso es efectuado de forma cíclica.

2.4.3 Medio de circulación. Este medio aplica únicamente para los sistemas de gestión térmica que cuentan con el funcionamiento de fluidos como medio térmico. Por esta razón, es necesario contar con mecanismos que direccionen los fluidos presentes en la gestión de temperatura. Los sistemas de circulación más comunes se mencionan a continuación.

2.4.3.1 Ductos de ventilación. Son canales artificiales que direccionan el flujo del aire destinado al manejo de la temperatura.

2.4.3.2 Tuberías hidráulicas. Medio de circulación para el transporte del fluido de refrigeración hacia todas las fases del circuito de gestión térmica.

2.4.3.3 Almacenamiento de fluido refrigerante (Sólo aplica para sistemas con refrigeración líquida). Debido a la naturaleza de este sistema de gestión térmica, el cual es un sistema de lazo cerrado, el fluido de gestión térmica debe ser almacenado en un recipiente dedicado para poder ejecutar el ciclo de funcionamiento.

2.4.4 Medio de intercambio de calor. Espacio en el cual ocurren transferencias de energía térmica entre dos o más sustancias con el fin de efectuar el proceso de gestión térmica. Los medios más comunes se mencionan a continuación.

2.4.4.1 Conjuntos de aletas. Superficies extendidas hechas de materiales con alta conductividad térmica usadas para la disipación de calor. Estas superficies se extienden sobre la superficie del elemento a gestionar; ocupan bastante área.

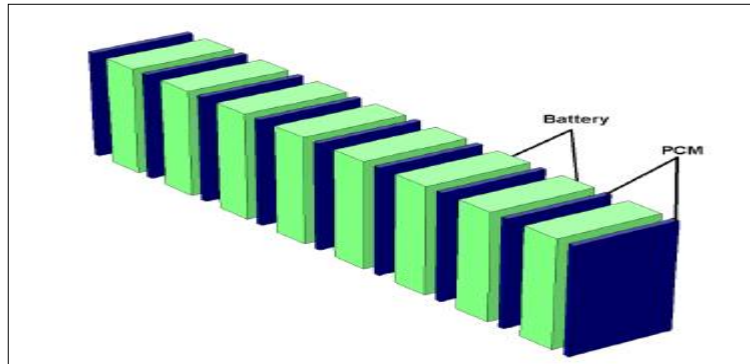
2.4.4.2 Radiador. Intercambiador de calor de flujo cruzado, el cual puede ser aire-aire o líquido-aire, donde ocurre la transferencia de energía térmica requerida para la regulación de temperatura de los fluidos destinados a la gestión térmica.

2.4.5 Controlador. Es el sistema que determina el tiempo en el cual el sistema de gestión térmica debe de estar activado. Este componente determina las variables de operación del respectivo sistema, tales como caudal de fluido, temperaturas de entrada y salida, voltajes de operación, corriente en el sistema, balanceo de celdas de batería y estado de operatividad del equipo.

2.5 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA BASADOS EN MATERIALES EN CAMBIO DE FASE (PCM)

La nueva generación de sistemas de gestión térmica va a estar en función de un nuevo tipo de materiales conocidos como materiales en cambio de fase, PCM por sus siglas en inglés, cuyas características combinan lo mejor de los sistemas de gestión basados en fluidos y solucionan muchos de los inconvenientes que suelen presentar estos equipamientos.

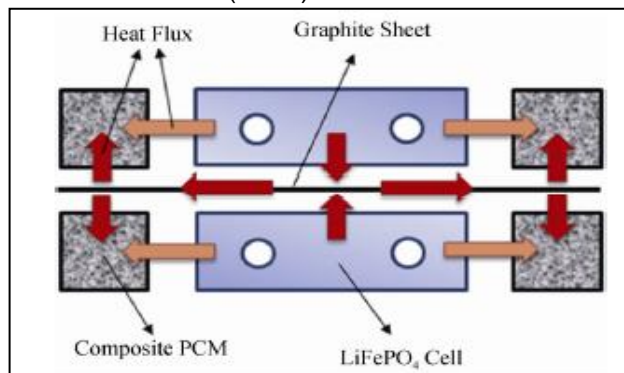
Imagen 29. Esquema de un sistema de gestión térmica Para baterías de litio mediante el uso de materiales PCM



Fuente: BAHIRAEI, Farid. Thermal Management of Lithium-Ion Battery Modules for Electric Vehicles. University of Windsor, 2017. p. 17.

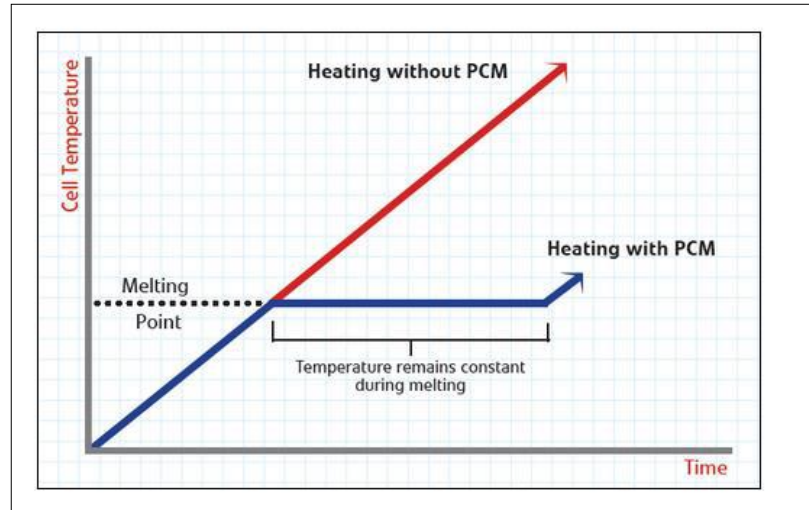
2.5.1 Funcionamiento. Los materiales en cambio de fase son aquellos que pueden mantener dos fases de materia, con el fin de disipar calor a través del calor latente del material, cuya superficie cercana a las zonas de disipación de calor se encuentra en fase líquida, mientras que las zonas más alejadas se encuentran en estado sólido. Este fenómeno hace que se retrase el proceso de calentamiento del equipo a gestionar hasta alcanzar el valor de calor latente del material.

Imagen 30. Representación de sistema de Enfriamiento mediante el uso de materiales en Cambio de fase (PCM)



Fuente: AN Zhoujian JIA Li DING Yong DANG Chao LI Xuejiao. A Review on Lithium-ion Power Battery Thermal Management Technologies Thermal Safety. vol. 26, no. 5, p. 398

Imagen 31. Gráfica de funcionamiento de los sistemas de Gestión térmica basados en materiales tipo PCM



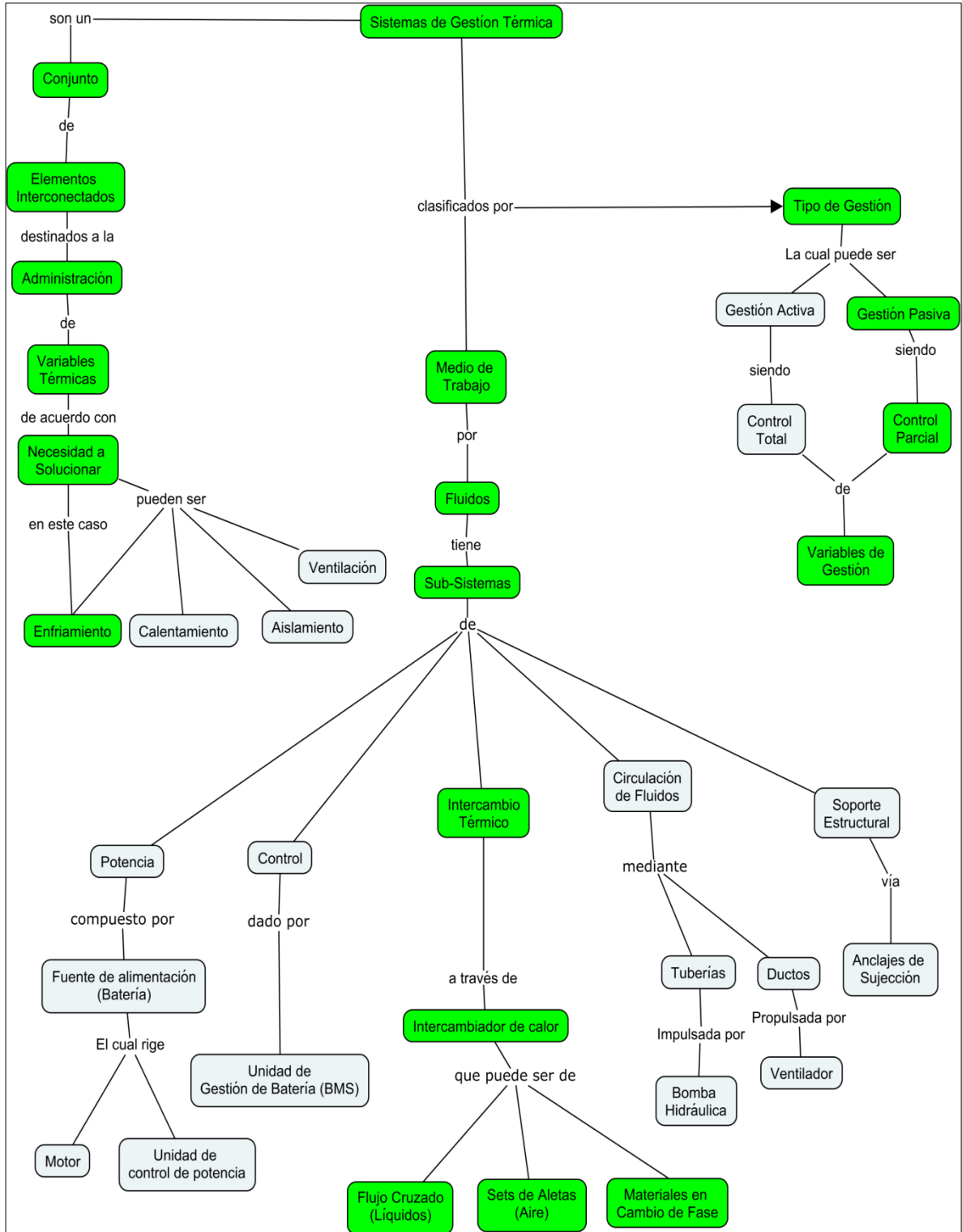
Fuente: LI, Jiling and ZHU, Zhen. Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. Chalmers University of Technology, 2014. p. 17

2.5.2 Materiales más comunes. Los materiales más usados para esta aplicación en la actualidad son de base parafínica y derivados del grafito. Este es uno de los ámbitos con mayor campo de investigación en la ciencia e ingeniería de materiales.

2.6 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA

El sistema de gestión térmica a diseñar está enfocado netamente a las funciones de enfriamiento y regulación de temperatura en la fuente de alimentación de un vehículo go-kart propulsado mediante un motor eléctrico. No se tendrán en cuenta ciertas funciones como calentamiento, ya que el vehículo no se va a utilizar en temperaturas excesivamente bajas. Dependiendo de la base del sistema, si es por fluidos o enteramente por material PCM se decide si éste es de tipo activo o pasivo. Para este diseño no se tendrán en cuenta los parámetros térmicos del motor o algún otro componente del vehículo que precise de gestión térmica para su correcto funcionamiento.

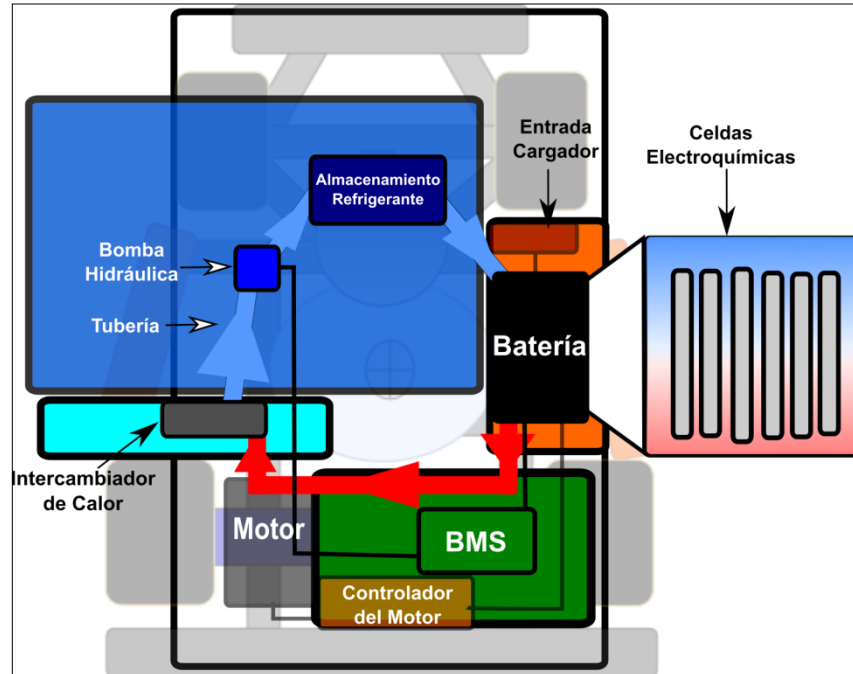
Imagen 32. Mapa conceptual de síntesis para sistemas de gestión térmica



Fuente: elaboración propia

Todo diseño a nivel ingenieril debe de estar simplificado por medio de sub-sistemas, con el fin de tener claridad acerca del sistema global a diseñar

Imagen 33. Esquema del sistema de gestión térmica a diseñar



Fuente: elaboración propia

Para la definición de parámetros, requerimientos y la selección apropiada de los criterios de diseño, incluyendo la selección de las posibles alternativas que se van a proponer con el fin de contrarrestar la situación a solucionar, se clasifican cada uno de los atributos estipulados previamente en dos tipos. Si el atributo es requerimiento, se asignan la letra R (requerido), y si se busca la mejor opción, pero no es primordial que sea la mejor alternativa posible, se asigna con la letra D (deseado) Con el fin de priorizar cada ítem para efectuar el proceso de planteamiento y selección de parámetros y alternativas, los cuales se encuentran descritos en los siguientes capítulos.

Cuadro 2. Elaboración de parámetros de evaluación para la selección de alternativas de solución

Requerimiento	R/D	Explicación
Batería	R	Las baterías deben tener una capacidad en Amperios-Hora (Ah) que permitan una descarga total en un tiempo inferior a 6 minutos, medido bajo el parámetro 10C a una temperatura de 25°C, de acuerdo al reglamento técnico de la FIA.
Eficiencia	D	Se debe utilizar la mejor eficiencia térmica posible, ya que de esto dependen las condiciones de rendimiento y degradación de las fuentes de potencia.
Peso	R	Los parámetros de peso del vehículo tipo kart eléctrico se encuentran estandarizados por la FIA
Ocupación de espacio	R	Las dimensiones del vehículo se encuentran estandarizadas por la FIA, por lo cual no se debe exceder ese parámetro.
Consumo energético	D	El sistema de refrigeración únicamente debe ser alimentado por las baterías de tracción por reglamento, las cuales pueden llegar a operar un voltaje de operación máximo hasta los 200 Volts.
Manejo de temperatura	R	El sistema debe mantener las celdas electroquímicas a un rango de temperatura entre los 20 y 40°C.

Fuente: elaboración propia

3. PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS

En el presente capítulo, se tratarán los parámetros y requerimientos necesarios para la delimitación correcta del sistema que se va a diseñar

3.1 REQUERIMIENTOS BAJO REGLAMENTO FIA PARA KARTS ELÉCTRICOS

La federación Internacional de Automovilismo (FIA), junto con la comisión Internacional de Karting (CIK) han diseñado un reglamento para la homologación de vehículos tipo go-kart que funcionan con energía eléctrica

3.1.1 Batería. La batería, o su respectivo conjunto, de acuerdo con el reglamento técnico, en su artículo 1.3.6.6²⁵ deben tener una capacidad medida en Amperios-Hora (Ah) mediante el uso del parámetro 10C, a una temperatura de 25°C, cuya descarga completa se debe de dar en un tiempo menor a 6 minutos. El sistema de gestión térmica a diseñar debe funcionar con este mismo set de baterías.

Mediante el estudio de la diversidad de compuestos derivados de las baterías de ion de litio y el artículo 2.4.2²⁶ y 4.4.4²⁷, se ha optado por el LiFePO₄, debido a ser el más usado a la fecha en esta clase de aplicaciones, y presenta una mayor claridad con respecto a los reglamentos; ya que este compuesto permite una mayor libertad con respecto al peso máximo que pueden manejar, con un máximo de 43 kg por set.

3.1.2 Dimensiones. El sistema de gestión térmica debe ser adaptable a karts que cumplan con las dimensiones requeridas para homologación FIA, los cuales se encuentran en los dibujos técnicos anexos al reglamento²⁸ (Ver Anexo A).

Los límites de dimensiones del compartimento de las baterías están debidamente estandarizados, siendo equivalentes a las dimensiones para el bodywork lateral, el cual es opcional. El límite de longitud para los anclajes varía entre los 0.4 m (400mm) y 0.5m (500mm); el límite frontal se limita a cotas entre los 0.15 m (150mm) detrás de la rueda delantera, 0.06 m (60 cm) adelante de la rueda trasera; el espacio con respecto al suelo debe estar entre 0.025m (25mm) y 0.06 m (60mm). El sistema de refrigeración también se podría colocar en la parte trasera del kart; el reglamento no dice estrictamente que no pueda haber nada en

²⁵ CIK-FIA; Opcit; p. 9

²⁶ íbid; p. 14

²⁷ íbid; p. 24

²⁸ íbid; p. 35

específico en esa sección, siempre y cuando no interfiera con las defensas traseras de uso obligatorio. Si se desea, las dimensiones disponibles en esta sección del vehículo están basadas en los requerimientos para las defensas traseras, comprendidas en un límite entre 0.015m (15mm) y 0.05m (50mm) detrás de las ruedas traseras, un ancho máximo disponible entre 1.34 m (134cm) y 1.4 m (140cm) y una distancia al suelo entre (25mm) y (60mm)

3.1.3 Peso del vehículo. El peso del kart está estandarizado en 80kg vacío, y debe estar entre 175 kg y 232 kg incluyendo conductor y baterías²⁹. Debido al compuesto elegido de batería, existe una relación máxima de peso - potencia por defecto, la cual es de 43 kg³⁰.

3.1.4 Seguridad eléctrica. El sistema requiere aislamiento en sus componentes eléctricos si el voltaje de operación supera los 48V³¹, con el fin de cumplir con las normas de seguridad eléctrica según el artículo 4.4.4.

3.1.5 Voltaje de operación máximo. Según el artículo 4.4, el voltaje máximo permitido es de 200 Volts³².

3.2 PARÁMETROS DESEADOS

Existe otro tipo de parámetros, los cuales son considerados como libres por el reglamento, o simplemente no existe legislación acerca de aquellos, pero que tienen variables que influyen en el diseño del sistema de gestión térmica y guardan cierta relación con:

3.2.1 Motor. Dado que la potencia del motor es libre, ésta debe de ser suficiente para que el kart alcance una velocidad de 27,78 m/s (100km/h), cuya aceleración está ente los 4 y 5 segundos en terreno plano. Esto sirve como criterio de selección para el motor del vehículo, cuya corriente máxima determina la generación de calor en la batería. El motor de referencia es de la marca Motenergy, de referencia ME 1507, cuya potencia es de 48KW, opera a un voltaje de 96V, y genera una corriente máxima de 600A.

²⁹ íbid; p. 15

³⁰ íbid; p. 28

³¹ íbid; p. 23

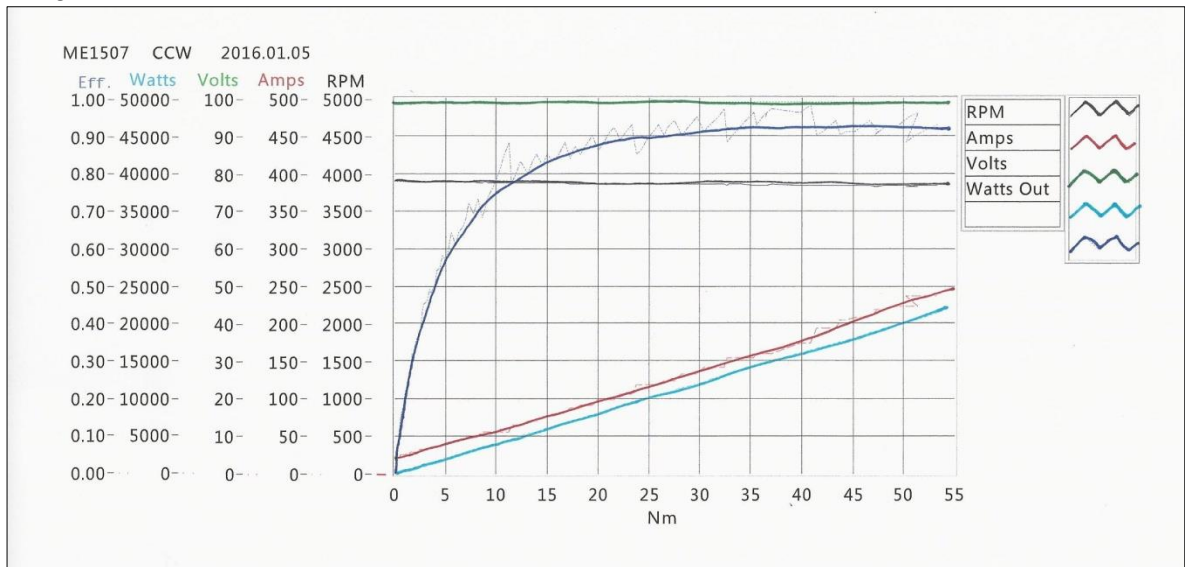
³² íbid; p. 23

Imagen 34. Motor eléctrico Motenergy ME 1507



Fuente: ELECTRIC MOTOR SPORT, INC. ME1507 Brushless 20 kW - 55 kW IPM Motor 48-120V. [Consultado el Sep 13,2019]. Disponible en: <https://www.electricmotorsport.com/me1507-brushless-65hp-ipm-motor-24-120v.html>

Imagen 35. Curva de rendimiento del motor conectado a una fuente de 96 volts



Fuente: ELECTRO MOTIVE FORCE, LLC. Motenergy ME1507. [Consultado el Sep 12,2019]. Disponible en: <https://www.emf-power.com/product/motenergy-me1507/>

Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor seleccionado

Especificaciones técnicas		
Especificación	Valor Numérico	Unidad
Peso	21.4	kg
Potencia Máxima	48	kW
Voltaje Máximo en DC	100	V
Corriente Máxima	600	A
Corriente Continua	157	A
Torque Continuo	32	Nm
Torque máximo	120	Nm
Velocidad Máxima	8000	rpm
Eficiencia	92	%
Resistencia Interna a 25°C	0.0027	Ω
Número de Polos	10	
Inductancia	62-110@1000Hz	μ H
Voltaje Constante	0.026	V/rpm
Torque Constante	0.22	Nm/A
Inercia de Rotor	960	kgcm ²
Brecha de Aire	2	mm

Fuente: elaboración propia con base en Motenergy Inc. ME1507 PMAC Brushless Motor. [Consultado el Sep 13, 2019]. Disponible en: <http://motenergy.com/mepmbrmo.html>

Como referencia para estos valores de velocidad y aceleración, se tomó al récord mundial de 3.5 segundos³³, el cual fue bajado a 3.1 segundos³⁴, ya que garantiza que el sistema pueda funcionar a condiciones críticas.

3.2.2 Rangos de temperatura. El rango óptimo de temperatura³⁵ de las baterías de ion de litio está entre los 20°C y 40°C, ya que éste se encuentra lejos de los límites críticos, y presenta las mejores condiciones de potencia, rendimiento y vida útil del sistema, sin importar el compuesto de la batería.

El diseño debe de mantener las baterías de tracción en ese rango de temperatura mientras el kart se encuentre en funcionamiento. Debido a la naturaleza del

³³ LINDE MATERIAL HANDLING AUSTRALIA. Linde E1 e-kart sets a NEW world record. -11-25. [Consultado el Aug 13,2019]. Disponible en: <https://lindemh.com.au/new-forklifts/news/linde-e1-e-kart-sets-a-new-world-record/>

³⁴ KANE,Mark. Kreisel Electric Cart Sets New Record - 0-100 km/h in 3.1 Seconds. Jul 20,. [Consultado el Aug 13,2019]. Disponible en: <https://insideevs.com/news/323102/kreisel-electric-cart-sets-new-record-0-100-km-h-in-31-seconds/>

³⁵ WICKRAMARATNE, Lahiru; Opcit; p.8

entorno competitivo y al comportamiento de la fuente de potencia, se buscará que el sistema de refrigeración mantenga la temperatura en valores cercanos a los 40°C.

3.2.3 Tiempo de duración de carrera. Las especificaciones de tiempo ayudan al dimensionamiento de ciertos componentes del sistema, en especial los que se encuentran relacionados a dimensionamiento de componentes de almacenamiento. La mayoría de configuraciones de karts eléctricos, junto con la duración promedio de carreras concernientes a los ámbitos profesional y recreativo es de 25 minutos.

4. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Con bases en los parámetros y requerimientos mínimos estipulados en el capítulo anterior, se procede a elegir los criterios de selección y planteamiento de alternativas que pretenden darle solución a la situación planteada, la mejor alternativa será llevada al proceso de diseño detallado, con el fin de proseguir al siguiente objetivo del presente trabajo.

4.1 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA

Para la selección de la alternativa de solución más adecuada, se utilizará el método de scoring, teniendo en cuenta los siguientes criterios de selección, los cuales se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Criterios de selección para ser Aplicados en el método de scoring con Sus respectivos valores porcentuales

Criterio	Importancia
Eficiencia	20
Peso	13
Ocupación de Espacio	10
Consumo Energético	12
Manejo Temperatura	25
Complejidad	15
Costo	5
Total	100

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta lo que se busca en el diseño de las posibles alternativas de solución, se ha planteados las siguientes alternativas, las cuales van a ser evaluadas en una escala de 1 a 5, donde el valor 1 es el menos deseado y el 5 es el más deseado. En el numeral 4.5 del presente capítulo, se desarrollará el método de scoring aplicado para determinar la alternativa que mejor se ajuste a los criterios de selección previamente mostrados.

4.2 SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA MEDIANTE EL USO DE CONVECCIÓN FORZADA DE AIRE

Esta alternativa cuenta con aletas que canalizan el aire a través de la sección longitudinal del compartimiento de las baterías, sumado a ductos que conducen el

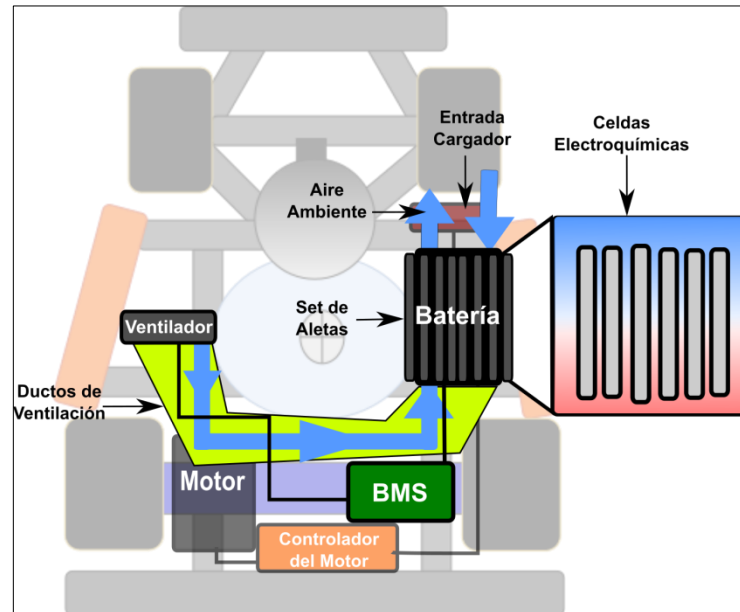
aire desde el ventilador hasta el interior de la carcasa de la batería, encargados de llevar el aire forzado proveniente de un ventilador localizado en la parte trasera del kart, con el fin de alcanzar las respectivas celdas electroquímicas, cuya temperatura debe de ser controlada.

Cuadro 3. Comparación entre las ventajas y desventajas de la alternativa de solución de convección forzada por aire.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo.	Bajo rendimiento térmico.
Baja complejidad.	Incapacidad de manejar grandes cargas.
Instalación simple.	Fluido de trabajo susceptible a condiciones del ambiente (Contaminación).
Prácticamente ausencia de mantenimiento.	No controla bien la degradación.
Fácil operación.	

Fuente: Elaboración propia

Imagen 36. Bosquejo de la alternativa de solución Basada únicamente en aire



Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Criterio de selección aplicado a
La primera alternativa de solución

Refrigeración por aire	
Criterio	Importancia
Eficiencia	2
Peso	4
Ocupación de Espacio	5
Consumo Energético	4
Manejo Temperatura	2
Complejidad	4
Costo	5

Fuente: elaboración propia

4.3 SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA BASADO EN INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE-LÍQUIDO

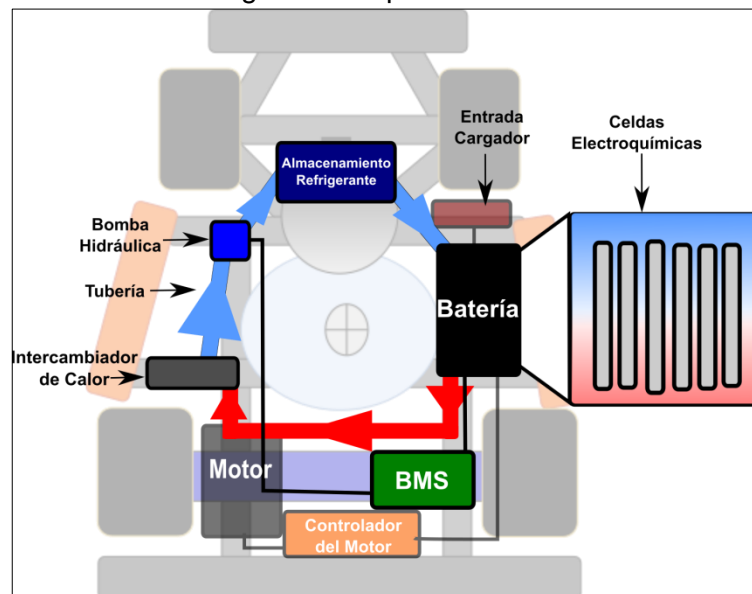
Esta alternativa busca llevar la tecnología existente y mejorada usada en los karts de combustión, y adaptarla al caso eléctrico. Este proceso, en comparación de los automóviles, es mucho más sencillo de lograr, ya que no es necesario realizar modificaciones al chasis y demás componentes adicionales y existentes, salvo la instalación respectiva del conjunto propulsor. El método de refrigeración líquida a utilizar será el indirecto, con el fin de minimizar los fluidos en contacto y poder manejar el sistema a una presión diferente a la atmosférica. Las tuberías con el fluido refrigerante recorrerían las cavidades internas donde se encuentran las celdas electroquímicas, realizando el proceso de transferencia de calor mediante un intercambiador aire-agua, de una forma muy similar al radiador de un automóvil convencional, siendo también aplicado a los vehículos go-kart de combustión interna, en especial aquellos que son destinados para uso en competencias de alto nivel, tanto amateur como profesional.

Cuadro 4. Comparación entre las ventajas y desventajas de la presente alternativa de solución por refrigeración líquida

Ventajas	Desventajas
Buena eficiencia y rendimiento térmico. (4 veces mayor que el aire)	Susceptibilidad a fugas de fluido de trabajo.
Muy buen manejo de grandes cargas y condiciones agresivas.	Sistema complejo debido a sus componentes.
Fluido independiente de condiciones ambiente.	Costo inicial elevado.
Incremento considerable de vida útil en batería.	Sistema crítico.

Fuente: elaboración propia

Imagen 37. Bosquejo de la alternativa de solución Basada en la refrigeración líquida



Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Criterio de selección aplicado
A la segunda alternativa de solución

Refrigeración Líquida	
Criterio	Importancia
Eficiencia	4
Peso	3
Ocupación de Espacio	3
Consumo Energético	3
Manejo Temperatura	4
Complejidad	3
Costo	4

Fuente: Elaboración propia

4.4 SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA BASADO EN MATERIALES EN CAMBIO DE FASE (PCM)

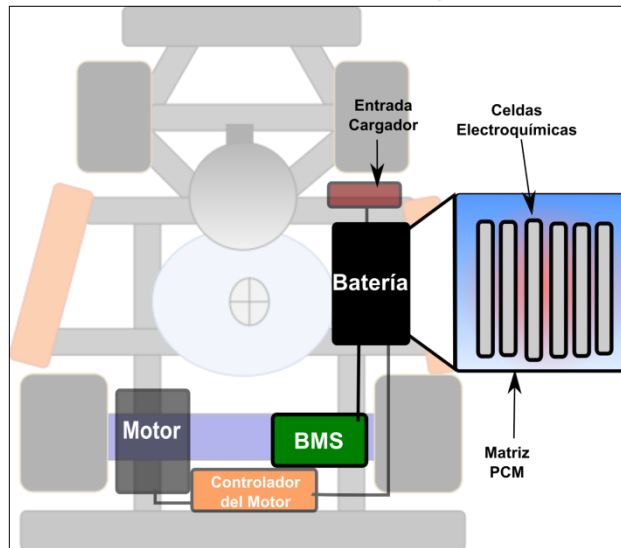
Esta alternativa es la más radical en el presente planteamiento, ya que involucra la aplicación de materiales nunca vistos en un vehículo de las características tratadas en esta investigación. Las celdas electroquímicas estarán inmersas en un material de base parafínica, que cumpla con las características de un material PCM.

Cuadro 5. Comparación entre las ventajas y desventajas de la alternativa de solución con materiales PCM

Ventajas	Desventajas
Máxima eficiencia posible (Calor latente).	Tecnología inestable.
Cero mantenimientos.	Alta corrosión.
Mejor manejo de grandes diferenciales de temperatura.	En fase de investigación, no se ha encontrado el material apropiado.
	Subutilización del sistema.

Fuente: elaboración propia

Imagen 38. Bosquejo de la alternativa de Solución Basada en materiales tipo PCM



Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Criterio de selección aplicado a la Tercera y última alternativa de solución

Refrigeración por PCM	
Criterio	Importancia
Eficiencia	4
Peso	4
Ocupación de Espacio	5
Consumo Energético	3
Manejo Temperatura	4
Complejidad	1
Costo	1

Fuente: elaboración propia

4.5 EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

El método de evaluación de la alternativa final, tal como se describió al principio de este capítulo, se hará mediante el método de ponderación por scoring, el cual consiste en la ponderación del porcentaje total de los criterios de evaluación y las calificaciones asignadas a cada alternativa de solución planteada. Para dar la ponderación final, se realiza la sumatoria del producto de la multiplicación entre el puntaje asignado a cada alternativa de solución y el porcentaje de importancia de cada criterio de selección.

Ecuación 6. Método de ponderación por scoring,
 Seleccionado para toma de decisiones Multi-criterio

$$S_i = \sum_{j=0}^M w_j r_{ij}$$

Fuente: RUBY, Annette J.; AISHA, Banu W. and SUBASH, Chandran P. Comparison of Multi Criteria Decision Making Algorithms for Ranking Cloud Renderfarm Services. En: INDIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. Nov 29.

Con base en la ecuación previamente descrita, se procede a elaborar el método de evaluación con cada una de las alternativas planteadas, cuyos resultados se evidencian en la siguiente tabla.

Tabla 6. Método de ponderación scoring para las alternativas de solución planteadas

Criterio	Importancia	Refrigeración por aire		Refrigeración Líquida		Refrigeración por PCM	
		Puntuación	Ponderado	Puntuación	Ponderado	Puntuación	Ponderado
Número de componentes	0.2	2	0.4	4	0.8	4	0.8
Peso	0.13	4	0.52	3	0.39	4	0.52
Ocupación de Espacio	0.1	5	0.5	3	0.3	5	0.5
Consumo Energético	0.12	4	0.48	3	0.36	3	0.36
Manejo Temperatura	0.25	2	0.5	4	1	4	1
Complejidad	0.15	4	0.6	3	0.45	1	0.15
Costo	0.05	5	0.25	4	0.2	1	0.05
Total	1		3.25		3.5		3.38
Ranking			3		1		2
Continuar?			No		Si		No

Fuente: elaboración propia

Por el criterio de evaluación planteado, la alternativa de solución más conveniente a diseñar, es la refrigeración líquida, ya que es la más completa que existe a pesar de no tener algún punto específico por el que pueda sobresalir, al menos en la actualidad, donde es la más usada en el desarrollo de vehículos eléctricos de alto rendimiento. La refrigeración por aire habría sido una buena alternativa si el vehículo a trabajar no se sometiera al nivel de carga al cual se somete un go-kart. Y el sistema de refrigeración PCM aún se encuentra en fase de investigación, y se ha comprobado a través de información provista por la empresa estado-unidense Rattlesnake, especializada en vehículos eléctricos de competición y karts, que el uso de ciertos materiales como sales hidratadas, que reducen la vida útil de las baterías en 18 meses.³⁶ Producto de la alta corrosión de esta clase de agentes, y el uso de parafinas, aún no se logra estabilizar esta clase de materiales en el

³⁶ HILLEMANN RICHARD <widoworx@gmail.com>. "Rattlesnake". [Correo Electrónico]. 16 de Marzo de 2.019. Enviado a usuarios de la universidad.

rango de temperaturas que se pretenden manejar, por lo cual es mejor continuar con el proceso investigativo en esos nuevos materiales para tener más información acerca del tema, antes de aplicar soluciones prácticas de tipo experimental, las cuales no demoran en iniciar en un corto plazo.

5. DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA

Con la determinación de la respectiva alternativa de solución, el cual es un sistema de refrigeración líquida, se deben determinar ciertas condiciones previas como las variables de gobierno y la potencia requerida. Con base en esto, se empieza a calcular el resto de los valores críticos de los parámetros teóricos, finalizando con las dimensiones de cada componente y la selección de equipamiento, asegurando que se cumpla las condiciones de funcionamiento requeridas.

5.1 SUBSISTEMAS INVOLUCRADOS

En un proceso de diseño se debe tener un orden estricto y metódico en función de lograr el mejor resultado posible y entendible. Por tal motivo, el diseño del presente sistema de gestión térmica se dividirá en los siguientes subsistemas presentados a continuación.

5.2 SUBSISTEMA DE POTENCIA

Teniendo en cuenta los parámetros de voltaje y corriente provenientes del motor, el cual es el componente principal del vehículo go-kart, se procede a configurar los parámetros necesarios para el diseño de la fuente de alimentación, con el fin de determinar la generación de calor que ésta presenta, dando el primer valor requerido para el sistema de gestión térmica. El proceso finaliza con la selección del tipo de celdas electroquímicas que componen la batería y su respectivo dimensionamiento según las dimensiones del vehículo.

5.2.1 Capacidad de la batería. De acuerdo con los valores arrojados por la gráfica de rendimiento (imagen 35) y la tabla de especificaciones del motor seleccionado (tabla 1), se concluye que la corriente máxima es de 600 Amperios. Con este valor numérico, adicionando el parámetro de funcionamiento estipulado en el reglamento (ver numeral 3.1.2 del presente trabajo) la tasa de descarga empleada está dada por el parámetro 10C, diseñada para condiciones de alto flujo de corriente, alta potencia y baja duración de carga. Con el uso de estos datos, se procede a hallar la capacidad total de la batería en amperios-hora (Ah) mediante esta relación matemática.

Ecuación 7. Capacidad de batería

$$C_b = \frac{I_{max}}{\text{Parámetro } C} \times 1h$$

Fuente: X- Engineer. EV design – battery calculation – x-engineer.org. [Consultado el Dec 5,2019]. Disponible en: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/electric-vehicles/ev-design-battery-calculation/>

Donde:

- C_b : Capacidad de la batería.
- I_{max} : Corriente máxima del sistema.
- Parámetro C: Parámetro de descarga de corriente del sistema.

Ahora se reemplazan los valores numéricos correspondientes a los datos previamente obtenidos.

$$C_b = \frac{600A}{10} \times 1h$$

$$C_b = 60Ah$$

Como conclusión, la capacidad mínima de suministro de corriente con la cual la batería debe de operar es de 60Ah; esto quiere decir que esta fuente de alimentación debe de ser capaz de proveer 60 Amperios en una hora en teoría. En la práctica, esta capacidad está medida bajo un parámetro que permite una descarga total en un rango inferior a seis minutos, debido al tipo de funcionamiento que la batería va a desempeñar.

5.2.2 Energía disponible de batería. La energía disponible en las baterías se da en términos de la potencia disponible. En este caso, la forma de hallar la energía disponible se da por la multiplicación de la capacidad de la fuente de alimentación al parámetro de funcionamiento previamente establecido por el máximo voltaje de operación del sistema, el cual es de 96 volts.

Ecuación 8. Energía de batería

$$E_{bp} = C_b \times V_{bp} \times \left(\frac{1kWh}{1000Wh} \right)$$

Fuente: X- ENGINEER. EV design – battery calculation– x-engineer.org. [Consultado el Dec 5,2019]. Disponible en: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/electric-vehicles/ev-design-battery-calculation/>

Donde:

E_{bp} : Energía disponible de batería.

C_b : Capacidad de la batería.

V_{bp} : Voltaje de la batería.

$$E_{bp} = 60Ah \times 96V \times \left(\frac{1kWh}{1000Wh} \right) = 5,76kWh \approx 6kWh$$

$$E_{bp} = 6kWh$$

Con este dato, se procede a seleccionar la configuración más adecuada de baterías para satisfacer la primera serie de requerimientos generales previamente establecidos.

5.2.3 Selección de celda electroquímica. Debido a la aplicación tan específica de este estudio, es necesario armar la batería de acuerdo al vehículo. Por tal motivo se procede a buscar la celda electroquímica tipo LFP, cuyas especificaciones cumplan con el parámetro 10C y sea la más adecuada para este uso, determinando la generación de calor de la fuente de potencia.

5.2.4 Propiedades de celda. La celda escogida es la ECPC Fortune 60Ah³⁷, debido a su baja impedancia, además que cumple con los parámetros generales de capacidad, energía y corriente máxima, siendo la celda más conveniente para la batería del kart.

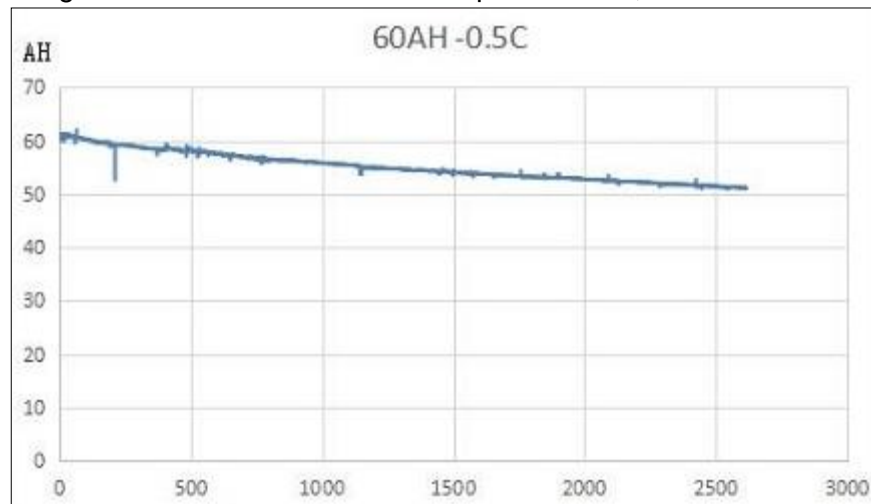
³⁷ ELECTRIC CARS PARTS COMPANY. Affordable Electric Vehicle Batteries & Components from Electric Car Parts Company. [Consultado el Sep 20,2019]. Disponible en: <https://www.electriccarpartscompany.com/>

Imagen 39. Celda electroquímica ECPC Fortune 60Ah



Fuente: ELECTRIC CARS PARTS COMPANY. Affordable Electric Vehicle Batteries & Components From Electric Car Parts Company. [Consultado el Sep 20,2019]. Disponible en: <https://www.electriccarpartscompany.com/>

Imagen 40. Curva de rendimiento a parámetro 0,5C



Fuente: ELECTRIC CARS PARTS COMPANY. Affordable Electric Vehicle Batteries & Components From Electric Car Parts Company [Consultado el Sep 20,2019]. Disponible en: <https://www.electriccarpartscompany.com/>

Las especificaciones técnicas de la celda seleccionada se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de la celda seleccionada

Especificaciones técnicas de celda			
Especificación	Valor Numérico	Unidad	Referencia
Capacidad Nominal	60	Ah	1/3C
Corriente continua máxima en descarga	180	A	<3C
Corriente de carga Estándar	30	A	10C
Corriente máxima de carga	600	A	10C
Corriente máxima de descarga	600	A	
Voltaje Nominal	3,2	V	
Voltaje Máximo	3,65	V	
Voltaje Mínimo	2,2	V	
Ciclos	>3000	Ciclos	
Impedancia	0,8	mΩ	
Temperatura de carga	(0-50)	°C	
Temperatura de descarga	(-20-50)	°C	
Temperatura de almacenamiento	(-10-45)	°C	
Tipo de batería	LFP		

Fuente: elaboración propia, con base en: ELECTRIC CARS PARTS COMPANY. Affordable Electric Vehicle Batteries & Components From Electric Car Parts Company. [Consultado el Sep 20,2019]. Disponible en: <https://www.electriccarpartscompany.com/>

5.2.5 Número de celdas. Ya escogida la celda a utilizar, se debe armar la configuración más conveniente para alcanzar los parámetros de funcionamiento generales de los numerales 5.3.1 y 5.3.2 del presente trabajo. El proceso inicia con la búsqueda del número ideal de celdas conectadas en serie, hallado mediante la relación de voltajes nominales de batería y celda electroquímica.

Ecuación 9. Número de celdas

$$N_{cs} = \frac{V_{bp}}{V_{bc}}$$

Fuente: X- Engineer. EV design – battery calculation– x-engineer.org. [Consultado el Dec 5,2019]. Disponible en: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/electric-vehicles/ev-design-battery-calculation/>

Donde:

N_{cs} : Número total de celdas del sistema.

V_{bp} : Voltaje total del sistema.

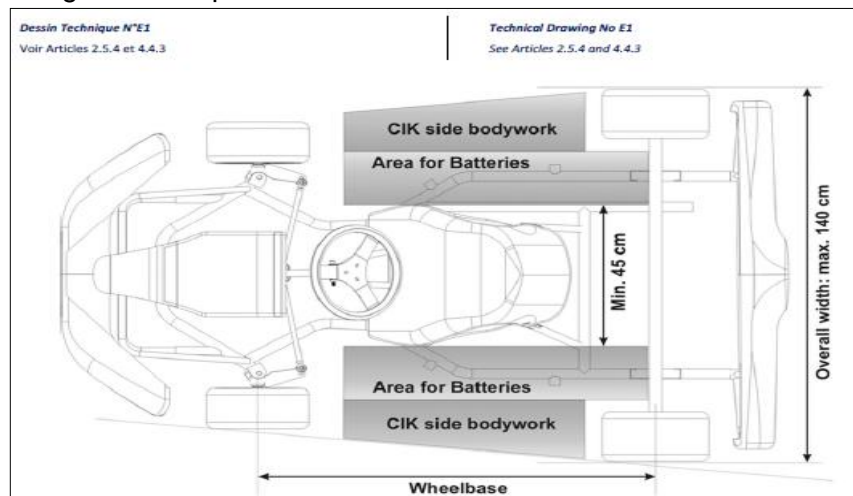
V_{bc} : Voltaje nominal de celda.

$$N_{cs} = \frac{96V}{3,2V} = 30$$

Con este valor, se procede al dimensionamiento del modulo de baterías del kart, el cual se encuentra debidamente descrito en el siguiente numeral.

5.2.6 Espacio disponible para baterías. El reglamento técnico ha determinado un espacio para las baterías de tracción, el cual está localizado lateralmente en los pontones del kart. Se sugiere usar este espacio debido a que no afecta en gran manera el centro de gravedad del vehículo.

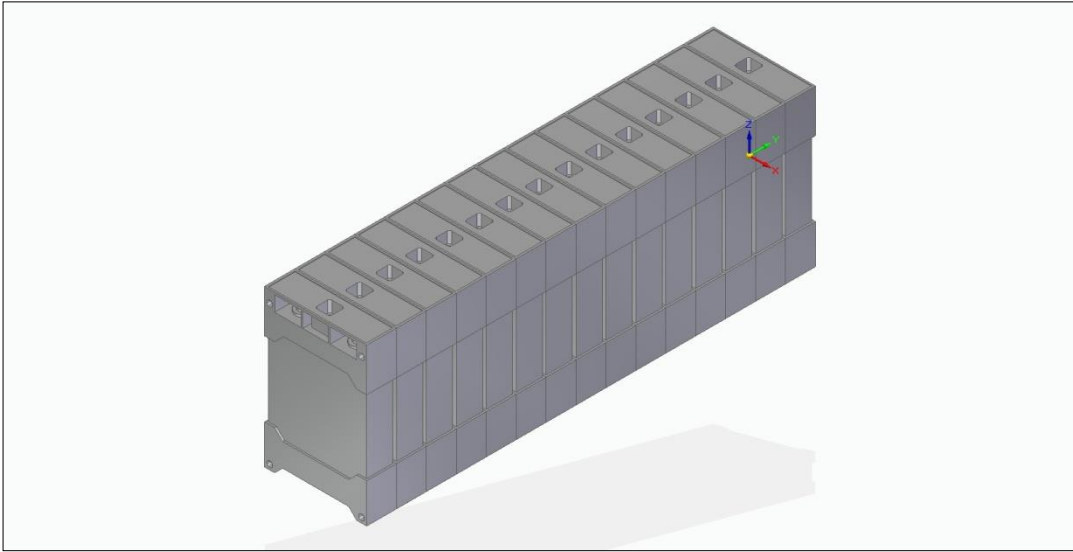
Imagen 41. Esquema de localización de las baterías



Fuente: CIK- FIA. Règlement Technique Pour Les Karts Electriques (E-Karting). p. 39

5.2.7 Dimensionamiento de módulo. Teniendo el total de parámetros de batería, se procede al diseño del módulo, el cual es dado de acuerdo a las dimensiones disponibles del vehículo y la celda escogida. La configuración más acorde para el vehículo está compuesta de dos módulos de 15 celdas conectados en serie. Cada módulo tiene un voltaje nominal de 48 volts, dando como resultado una conexión en serie de 96 volts. Se escoge esta configuración con el fin de cargar simétricamente el kart y no haya gran afectación en su respectivo centro de gravedad.

Imagen 42. Módulo de baterías del kart



Fuente: elaboración propia

Las dimensiones del módulo de batería son 591mm X134,5mm X 206mm, los cuales están dentro del área destinada para los elementos de potencia, la cual es especificada en el numeral 5.3.6.

5.2.8 Generación de calor. Con el uso de la corriente total de la batería, y la obtención de las especificaciones técnicas del tipo de celda a usar, usando los valores de resistencia y cantidad empleada, se puede determinar el valor de regimiento del sistema de gestión térmica, el cual es la carga térmica a contrarrestar.

Ecuación 10. Generación de calor

$$\dot{Q}_{bp} = I_{max}^2 R N_{cs}$$

Donde:

\dot{Q}_{bp} : Generación de calor de la batería.

I_{max} : Corriente máxima del sistema.

R : Impedancia interna de la celda.

N_{cs} : Número de celdas.

$$\dot{Q}_{bp} = (600A)^2 \times 0,0008\Omega \times 30 \times \left(\frac{1kW}{1000W} \right)$$

$$\dot{Q}_{bp} = 8,64kW$$

La carga térmica con la cual el sistema de gestión térmica debe trabajar es de 8,64 kW. Este paso es la conclusión del diseño del subsistema de potencia.

5.3 FLUIDOS DE TRABAJO

El sistema de gestión térmica necesita operar con dos fluidos de refrigeración, los cuales se mencionan a continuación.

5.3.1 Agua. Este es el fluido de refrigeración que absorbe la energía calórica generada por la fuente de potencia. Las propiedades del fluido se toman a una temperatura promedio de 40°C, debido a que es la temperatura más crítica del sistema a gestionar, de acuerdo con los lineamientos del numeral 3.2.2 del presente trabajo. Se escoge este fluido de refrigeración debido a la gran cantidad de información disponible acerca de este fluido y su accesibilidad.

Tabla 8. Propiedades del refrigerante a una temperatura de 40°C

Propiedades Agua a 40°C		
Criterio	Valor numérico	Unidad de medida
Densidad	992.1	kg/m ³
Calor Específico	4179	J/kg°C
Conductividad Térmica	0.631	W/m°C
Viscosidad Dinámica	0.000653	kg/ms
Coefficiente de expansión (β)	0.000377	1/K
Número de Prandtl	4.32	
Viscosidad Cinemática	6.582E-07	m ² /s

Fuente: elaboración propia, con base en con base en ÇENGEL, Yunus A. and GHAJAR, Afshin J. Heat and Mass Transfer. 5th ed. New York: McGraw Hill, 2015. p.920. ISBN 9780073398181

5.3.2 Aire. El objetivo de este fluido es controlar la temperatura del agua refrigerante que absorbe el calor proveniente de las baterías, el cual es transferido al fluido de refrigeración. Las propiedades de este fluido serán tomadas a una temperatura promedio de 25°C, debido a que esta temperatura es un estándar de tipo universal para las temperaturas ambiente.³⁸

Tabla 9. Propiedades del aire estándar a una temperatura de 25°C
Propiedades Aire a 25°C

Criterio	Valor numérico	Unidad de medida
Densidad	1.184	kg/m ³
Calor Específico	1007	J/kg°C
Conductividad Térmica	0.02551	W/m°C
Difusividad Térmica	0.00002141	m ² /s
Viscosidad Dinámica	0.00001849	kg/ms
Viscosidad Cinemática	0.00001562	m ² /s
Número de Prandtl	0.7296	

Fuente: elaboración propia, con base en ÇENGEL, Yunus A. and GHAJAR, Afshin J. Heat and Mass Transfer. 5th ed. New York: McGraw Hill, 2015. p.926. ISBN 9780073398181

5.4 SUSBSISTEMA DE INTERCAMBIO TÉRMICO

La transferencia de calor del sistema es igualada en todos los componentes del sistema a la carga térmica de diseño previamente calculada.

Ecuación 11. Balance energético general de un Sistema de gestión térmica basado en fluidos

$$\dot{Q}_{bp} = \dot{Q}_{aire} = \dot{Q}_{refrigerante}$$

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_a C_p (T_2 - T_1)$$

Fuente: LAMARRE, Jeff. FSAE Electric Vehicle Cooling System Design. University of Akron, 2017. p. 250-251. Modificada propiamente Para que coincida notación

Expandiendo la ecuación correspondiente, respecto a las propiedades de los fluidos de trabajo da como resultado la siguiente expresión de tasa de transferencia de calor.

³⁸ CIK-FIA; opcit; p.42

$$\dot{Q}_{bp} = m_{aire} C_{p\ aire} (T_{aire\ 2} - T_{aire\ 1}) = m_{lr} C_{p\ lr} (T_{lr\ 2} - T_{lr\ 1})$$

Esta expresión iguala la tasa de generación de calor proveniente de la carga térmica de diseño y es un factor determinante para el paso final de dimensionamiento del intercambiador.

5.4.1 Ecuación de gobierno. En este apartado, se cubren los detalles relativos al diseño del radiador que va a manejar los deltas de temperaturas en el sistema. Lo primero que se debe de tener en cuenta son las temperaturas de funcionamiento, las cuales le van a dar valores a la ecuación de gobierno de este componente.

Ecuación 12. Ecuación de gobierno de Intercambiadores de calor

$$\dot{Q} = UA\Delta T_m$$

Fuente: BERGMAN, T. L. and INCROPERA, Frank P. Fundamentals Of heat and mass transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. P.116

A continuación, se procede a resolver esta ecuación punto por punto, con el fin de establecer los parámetros numéricos de funcionamiento del intercambiador de calor, el cual es la pieza central del presente sistema de gestión térmica.

5.4.2 Datos térmicos de entrada. Para obtener la obtención correcta del diseño del intercambiador de calor, es necesario establecer ciertos parámetros de entrada, los cuales se establecen de forma previa y se mencionan a continuación.

5.4.2.1 Carga térmica. La carga térmica es la generación de calor proveniente del subsistema de potencia, cuyo valor es de 8,64 kW.

$$\dot{Q}_{bp} = 8,64kW$$

5.4.2.2 Diferencia de temperatura del aire. El aire usado tiene unas propiedades de entrada correspondientes a la temperatura de 25°C por reglamento; por lo tanto, es necesario encontrar dos temperaturas para el aire utilizado, cuyo promedio sea de 25°C y hallar la respectiva diferencia de temperatura o delta T.

$$\frac{T_{aire\ 1} + T_{aire\ 2}}{2} = 25^{\circ}C$$

La temperatura inicial escogida es igual a aquella que se promedia en la ciudad de Bogotá, cuyo valor es de 14°C³⁹

$$Si\ T_{aire\ 1} = 14^{\circ}C \rightarrow T_{aire\ 2} = 25^{\circ}C \times 2 - 14^{\circ}C$$

$$T_{aire\ 2} = 36^{\circ}C$$

$$\Delta T_{aire} = T_{aire\ 2} - T_{aire\ 1} = 36^{\circ}C - 14^{\circ}C$$

$$\Delta T_{aire} = 22^{\circ}C$$

Con esta diferencia de temperaturas, es posible trabajar el respectivo fluido con sus respectivas propiedades correspondientes a la temperatura promedio previamente estimada.

5.4.2.3 Diferencia de temperatura del refrigerante. El comportamiento del fluido siempre se estudia con propiedades que se encuentren a temperatura promedio.

Debido a que las propiedades del fluido deben ser tomadas a una temperatura promedio, por tal razón, se deben buscar dos temperaturas cuyo promedio sea igual a 40°C, la cual se encuentra en el umbral del parámetro de operación de la batería para, así mismo, hallar la correspondiente diferencia de temperaturas.

$$\frac{T_{lr\ 1} + T_{lr\ 2}}{2} = 40^{\circ}C$$

La temperatura inicial escogida es igual a la máxima permitida por la batería para su correcto funcionamiento durante el proceso de descarga, la cual es de 50°C.

$$Si\ T_{lr\ 1} = 50^{\circ}C \rightarrow T_{lr\ 2} = 40^{\circ}C \times 2 - 50^{\circ}C$$

$$T_{lr\ 2} = 30^{\circ}C$$

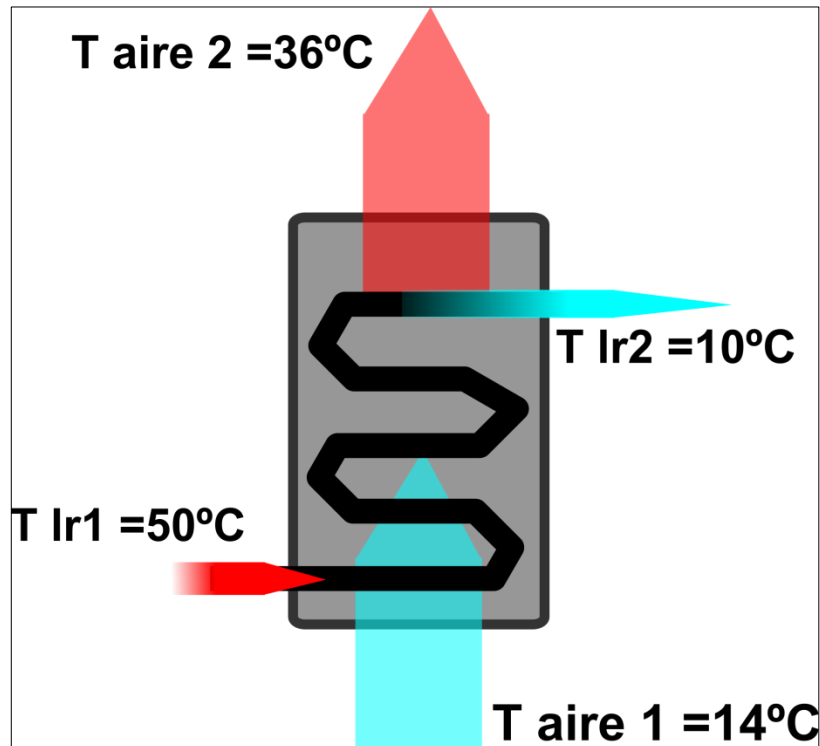
$$\Delta T = T_{lr\ 1} - T_{lr\ 2} = 50^{\circ}C - 30^{\circ}C$$

³⁹ Secretaría Distrital de Ambiente. Promedio de Temperatura Media Anual de las Estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá- Temp. [Consultado el Sep 12,2019]. Disponible en: <http://oab.ambientebogota.gov.co/indicadores/>

$$\Delta T_{lr} = 20^{\circ}\text{C}$$

Después de hallar las respectivas temperaturas, se dibuja un esquema para identificar con más claridad las temperaturas correspondientes a cada fluido de trabajo.

Imagen 43. Esquema de temperaturas del intercambiador de Calor



Fuente: elaboración propia

5.4.2.4 Flujo másico de aire. El flujo másico determina la cantidad de aire requerida para poder refrigerar el fluido con el calor proveniente de las baterías, además de ser un factor decisivo para determinar el área requerida para el intercambiador de calor. La forma de obtener este valor se da por el despeje de la variable de flujo másico de la ecuación básica de transferencia de calor.

$$\dot{Q}_{bp} = m_{\text{aire}} c_{p \text{ aire}} \Delta T_{\text{aire}}$$

$$m_{\text{aire}} = \frac{\dot{Q}_{bp}}{c_{p \text{ aire}} \Delta T_{\text{aire}}}$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{8,64kW}{1,0070 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \times 22^{\circ}C}$$

$$\dot{m}_{aire} = 0,39 \frac{kg}{s}$$

5.4.2.5 Flujo másico de refrigerante. Este valor determina la cantidad de refrigerante que va a pasar por el intercambiador de calor y el dimensionamiento de las tuberías del sistema; éste se obtiene mediante el despeje de la variable de flujo másico en la ecuación básica de transferencia de calor, sin variar la carga térmica.

$$\dot{Q}_{bp} = \dot{m}_{lr} \cdot C_{p\ lr} \Delta T_{lr}$$

$$\dot{m}_{lr} = \frac{\dot{Q}_{bp}}{C_{p\ lr} \Delta T_{lr}}$$

$$\dot{m}_{lr} = \frac{8,64kW}{4,17 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \times 20^{\circ}C}$$

$$\dot{m}_{lr} = 0,1033 \frac{kg}{s}$$

5.4.3 Datos geométricos de entrada. Debido al tipo de aplicación analizada en esta ocasión, se cuentan con restricciones de tipo espacial, con las cuales se restringe el intercambiador a nivel geométrico.

5.4.3.1 Dimensiones globales. Para poder determinar el comportamiento del intercambiador de calor, es necesario tener un conjunto de dimensiones disponible para poder establecer los parámetros geométricos del subsistema.

Imagen 44. Radiador New Line Serie R



Fuente: NEW LINE RACING. R Radiator – New Line Racing. [Consultado el Sep 28 ,2019]. Disponible en: <https://www.new-lineracing.com/en/product/r-radiator/>

Como referencia para poder estimar el área del intercambiador de calor, se analizan varios radiadores diseñados para este tipo de vehículos, con el fin de obtener las máximas dimensiones posibles. Las dimensiones de base para el intercambiador del presente diseño, son 200mm X 430mm X 40mm basados en el radiador New Line Serie R , usado para motor IAME X30 Sénior y karts categoría OK (Sin caja de cambios). Se usa este propulsor como referencia debido a la similitud en el rendimiento entre vehículos.

5.4.3.2 Tubería de refrigerante. Para la solución de este intercambiador, se necesita saber el diámetro de la tubería que va a transportar al interior de éste el fluido refrigerante seleccionado. Teniendo en cuenta el dimensionamiento previo del intercambiador, el cual tiene un espesor de 40mm, y la velocidad crítica del fluido en el aluminio, la cual es de $1,83\text{m/s}^{40}$, se aplica la siguiente fórmula matemática.

⁴⁰ Lytron Inc. Erosion-Corrosion In Cooling Systems. [Consultado el Sep 29,2019]. Disponible en: <https://www.lytron.com/product-support/resource.cfm?aid=1240>

Ecuación 13. Expresión de flujo másico de un fluido a través de una tubería

$$\dot{m} = \rho A_t v = \rho \frac{\pi D^2}{4} v$$

Fuente: Fuente: BERGMAN, T. L. and INCROPERA, Frank P. Fundamentals Of heat and mass transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. P.116

$$D_c = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi\rho v}}$$

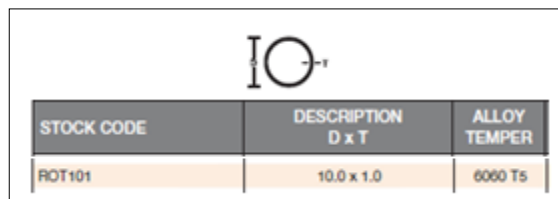
$$si v = 1,83 \frac{m}{s}$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4(0,1033 \frac{kg}{s})}{\pi(992,1 \frac{kg}{m^3})(1,83 \frac{m}{s})}}$$

$$D_c = 0,0085 m$$

Este valor obtenido corresponde al diámetro interno calculado de la tubería. Con este dato, se procede a seleccionar la tubería más acorde para la aplicación deseada.

Imagen 45. Dimensiones de referencia Para tubería del intercambiador de calor



STOCK CODE	DESCRIPTION D x T	ALLOY TEMPER
ROT101	10.0 x 1.0	6060 T5

Fuente: ACTION ALUMINIUM AUSTRALIA Catálogo 2018 p. 18

Se opta por usar una tubería redonda de 10mm de diámetro nominal con base en las especificaciones del fabricante Action Aluminium (ver Anexo B) y un grosor de pared de 1mm.

5.4.3.3 Dimensiones de aleta. La industria no maneja estándares generalizados para seleccionar la mejor combinación posible, se opta por tomar las dimensiones más comunes concernientes al espesor,⁴¹ utilizando un espesor de 0.05mm. Para la altura se escogió un valor de 20mm, tomado como cifra de referencia con respecto al espesor total del intercambiador y el diámetro de la tubería de refrigeración, el paso elegido es de 2mm. La forma de las aletas es cuadrada por el tipo de intercambiador a usar, y por cuestiones de espacio.

Tabla 10. Restricciones geométricas de aleta

Propiedades Geométricas de Aleta		
Criterio	Valor numérico	Unidad de medida
Largo	20	mm
Ancho	20	mm
Espesor	0.05	mm
Paso	2	mm

Fuente: elaboración propia.

5.4.4 Diferencia Logarítmica de temperatura. Para la solución del primer ítem de la ecuación de gobierno del intercambiador, vital para el diseño de este componente, se deben contrastar las diferencias de temperatura de todo el sistema. Ya que el intercambiador no está trabajando con un único fluido y, por ende, se debe hallar la diferencia global de temperaturas del sistema, mediante la diferencia logarítmica de temperatura, cuyo valor se halla de esta manera.

Hallados los deltas de temperatura de cada uno de los fluidos involucrados, se procede a hallar la diferencia global ideal de temperatura, a la cual el intercambiador va a establecer su operación.

$$LMTD = \frac{(T_{lr1} - T_{aire2}) - (T_{lr2} - T_{aire1})}{\ln\left(\frac{T_{lr1} - T_{aire2}}{T_{lr2} - T_{aire1}}\right)}$$

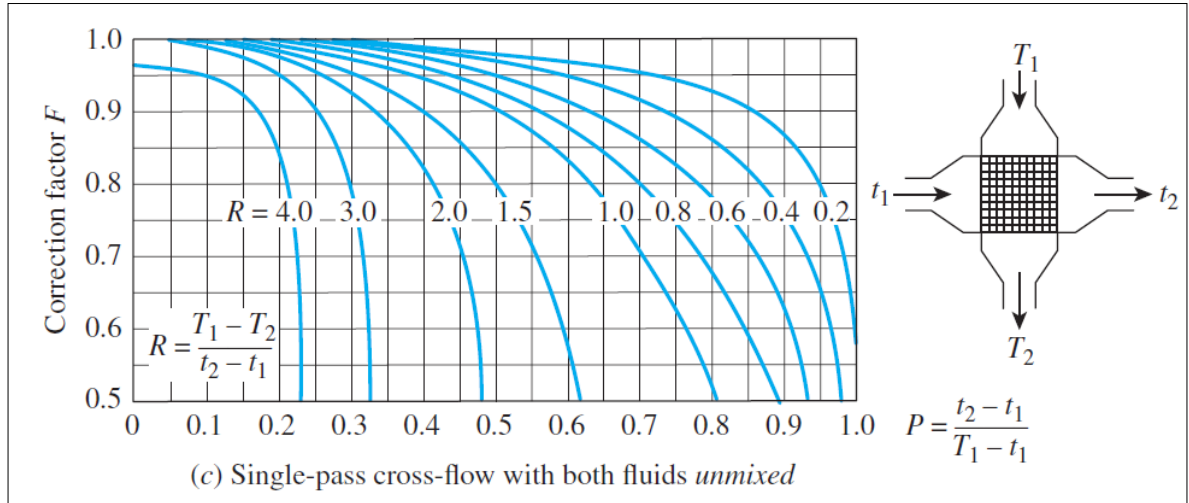
$$LMTD_{ideal} = \frac{(50^{\circ}C - 36^{\circ}C) - (30^{\circ}C - 14^{\circ}C)}{\ln\left(\frac{50^{\circ}C - 36^{\circ}C}{30^{\circ}C - 14^{\circ}C}\right)}$$

$$LMTD_{ideal} = 23,60^{\circ}C$$

⁴¹ SUNDÉN, Bengt and FU, Juan. Chapter 6 - Aerospace Heat Exchangers. En: SUNDÉN, Bengt and FU, Juan eds. Heat Transfer in Aerospace Applications. Academic Press, 2017. p. 98 ISBN 978-0-12-809760-1

Este es el delta ideal de temperatura que va a manejar el intercambiador de calor, al cual se aplica un factor de corrección según el tipo de intercambiador; en este caso, éste corresponde a uno de flujo cruzado. Existe un conjunto de gráficas estandarizadas para este tipo de intercambiador, con el fin de hallar el correspondiente factor de corrección.

Imagen 46. Gráfica de factor de corrección para intercambiadores de calor de flujo cruzado



Fuente: ÇENGEL, Yunus A. and GHAJAR, Afshin J. Heat and Mass Transfer. 5th ed. New York: McGraw Hill, 2015. p.666. ISBN 9780073398181

Mediante esta gráfica se determina el factor de corrección de la temperatura, el cual sale de las relaciones de temperaturas de los fluidos involucrados.

$$P = \frac{T_{aire2} - T_{aire1}}{T_{lr1} - T_{aire1}} = \frac{36^{\circ}\text{C} - 14^{\circ}\text{C}}{50^{\circ}\text{C} - 14^{\circ}\text{C}} = 0,61$$

$$R = \frac{T_{lr1} - T_{lr2}}{T_{aire2} - T_{aire1}} = \frac{50^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}{36^{\circ}\text{C} - 14^{\circ}\text{C}} = 0,9$$

Hallados esos valores, se hace el cruce de líneas en la respectiva gráfica para hallar el respectivo factor de corrección del intercambiador, cuyo valor se multiplica con la diferencia logarítmica ideal para dar la diferencia real.

$$CF = 0,8$$

$$LMTD_{real} = LMTD_{ideal} \times CF = 23,60^{\circ}\text{C} \times 0,8$$

$$\Delta T_m = LMTD_{real} = 18,88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Esta es la diferencia de temperaturas a la cual el radiador trabajará para las condiciones requeridas.

5.4.5 Coeficiente global de transferencia de calor. Con la obtención previa del delta de temperaturas del sub-sistema de intercambio de calor, se procede a hallar el coeficiente global de transferencia de calor. Para tal fin, es necesario hallar ciertos valores numéricos para hallar el parámetro más importante del intercambiador: el área. La fórmula general para hallar este coeficiente se muestra a continuación.

Ecuación 14. Formula de Coeficiente de transferencia de Calor global para intercambiadores De calor

$$U = \frac{1}{\frac{A}{A_i} \frac{1}{h_{lr}} + \frac{A}{A_i} R_{wall} + \frac{1}{h_{aire}}}$$

Fuente: PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy and CARVAJAL-MARISCAL, Ignacio. Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. 1-178 p. ISBN 9780128043974

Para tal fin, se necesitan ciertos valores numéricos con el fin de resolver este coeficiente.

5.4.5.1 Relación de áreas. Debido a la falta de información acerca del área real de intercambiador, se opta por hallar las propiedades de la superficie de refrigeración por un metro de longitud. Esta relación de áreas es constante sin importar la longitud real del sistema.

Para el área externa, se tienen en cuenta las áreas con y sin aletas del intercambiador.

$$A_{r1} = 2(fl^2 - 0,785d_o^2 + 2flft) \frac{L}{fp} z$$

$$A_{r1} = 2 \times ((0,02m)^2 - 0,785 \times (0,01m)^2 + 2 \times 0,02m \times 0,00005m) \times \frac{1m}{0,002m} \times 1$$

$$A_{r1} = 0,3235m^2$$

Para el área sin aletas, se tienen en cuenta algunas de las restricciones dimensionales de la aleta, las cuales son el espesor (ft) y el paso (fp)

$$A_{t1} = \pi d_o \left[L \left(1 - \frac{ft}{fp} \right) z + L_t \right] = \pi \times 0,01m \times \left[1m \left(1 - \frac{0,00005m}{0,002m} \right) 1 + 0 \right]$$

$$A_{t1} = 0,0306m^2$$

La suma de ambas áreas da como resultado el área superficial por metro de longitud del intercambiador.

$$A_1 = A_{r1} + A_{t1} = 0,3235m^2 + 0,0306m^2 = 0,3541m^2$$

Para el área exterior, se evalúa el área del sistema si la longitud es igual a un metro.

$$A_{o1} = \pi d_o L = \pi \times 0,01m \times 1m = 0,031m^2$$

El paso siguiente es relacionar esta área con el área superficial total por unidad de longitud.

$$\frac{A_1}{A_{o1}} = \frac{A}{A_o} = \frac{0,3541m^2}{0,031m^2} = 11,2723$$

Para el área interna, se repite el procedimiento ejecutado con el área exterior de la tubería.

$$A_{i1} = \pi d_i L = \pi \times 0,009m \times 1m = 0,028m^2$$

Finalmente se hace la relación de las dos áreas por un metro de longitud, la cual es igual a la relación real de áreas.

$$\frac{A_1}{A_{i1}} = \frac{A}{A_i} = \frac{0,3541m^2}{0.028m^2} = 12,5214$$

5.4.5.2 Coeficiente convectivo del área externa. Este es el coeficiente más complicado de hallar, ya que tiene en cuenta el tipo de arreglo de tubos, la velocidad del fluido externo y las relaciones de área previamente establecidas.

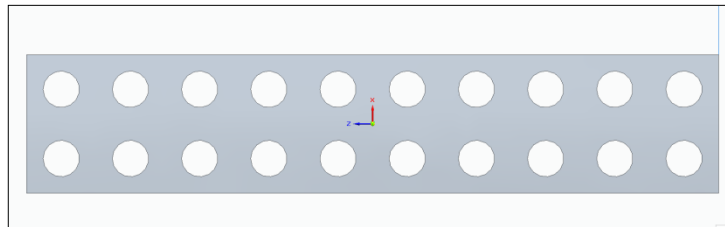
Ecuación 15. Fórmula de coeficiente Convectivo estándar para Intercambiadores de calor de flujo Cruzado

$$h_{ext} = 1,13 C_z C_q \frac{k_{aire}}{d_o} Re_{aire}^n Pr^{0,33}$$

Fuente: PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN Georgiy and CARVAJAL- MARISCAL, Ignacio. Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. 1-178 p. ISBN 9780128043974

Para resolver esta fórmula matemática, se define el número de tubos por medidas de altura y de espesor, cuyas dimensiones son 0,2m (200mm) X 0,04m (40mm), las cuales no tienen una ecuación asociada, ya que el arreglo de los tubos es en línea.; por lo tanto, se puede asumir según el criterio del diseñador, el cual se basa en las dimensiones de las aletas.

Imagen 47. Parametrización del máximo número De tubos del intercambiador según restricciones Dimensionales



Fuente: elaboración propia

Después de dimensionar el número de tubos, se concluye que el número máximo posible (z1) es de 20 tubos, los cuales se distribuyen en un número de hileras (z2)

de dos, con el fin de mantener un espaciamento simétrico entre los tubos con aletas, y evitando posibles interferencias entre las mismas.

Tabla 11. Restricciones de espaciamento entre tubos y aletas

Restricciones definidas de espaciamento		
Criterio	Valor numérico	Unidad de medida
Nº de tubos (z1)	20	tubos
Nº de hileras de tubos (z2)	2	hileras
Espaciamento horizontal	20	mm
Espaciamento vertical	2	mm

Fuente: elaboración propia

Los valores de espaciamento entre tubos son utilizados para encontrar el parámetro de forma (X), el cual determina el factor Cq de la ecuación principal, encargado de ajustar el coeficiente de convección según el arreglo de los tubos, el cual es en línea.

$$X = 4 \left(2 + \frac{\left(\frac{A}{A_o}\right)}{7} - \frac{S_2}{d_o} \right) = 4 \times \left(2 + \frac{11,2723}{7} - \frac{0,02m}{0,01m} \right)$$

$$X = 6,4413$$

Con esta cifra calculada, es posible resolver el coeficiente Cq, concerniente a la parte geométrica exterior del intercambiador.

Ecuación 16. Fórmula de coeficiente Cq para Intercambiadores de flujo cruzado

$$C_q = (1,36 - \tanh(X)) \left(\frac{1,1}{\left(\frac{A}{A_o}\right) + 8} - 0,014 \right)$$

Fuente: PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy And CARVAJAL-MARISCAL, Ignacio. Handbook For Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. 1-178 p. ISBN 9780128043974

$$C_q = (1,36 - \tanh(6,4413)) \left(\frac{1,1}{11,2723 + 8} - 0,014 \right)$$

$$C_q = 0,0155$$

El paso a seguir está dado por el cálculo del coeficiente C_z , el cual hace referencia a la corrección dada por el número de hileras de tubos (z_2), el cual es de dos.

$$C_z = 3,5 z_2^{0,03} - 2,72 = 3,5 \times 2^{0,03} - 2,72 = 0,8535$$

Ya solucionado el asunto de los coeficientes, se procede con el cálculo del número de Reynolds para el aire. Para llevar a cabo esta tarea, se deben calcular dos cifras previas, las cuales son:

- **Exponente de elevación:** De acuerdo con el autor de este modelo, el número de Reynolds del aire se debe elevar a un exponente, cuyo valor depende del parámetro geométrico X .

$$n = 0,7 + 0,08 \tanh(X) + 0,005 \left(\frac{A}{A_o} \right)$$

$$n = 0,7 + 0,08 \times \tanh(6,4413) + 0,005 \times 11,2723 = 0,8363$$

Este es el exponente al cual se eleva el número de Reynolds para poder encontrar el coeficiente convectivo.

- **Velocidad del aire a través del intercambiador:** Para hallar la velocidad del aire, se deben tener en cuenta dos aspectos importantes, los cuales se conforman por el volumen específico del fluido refrigerante y el área libre de circulación del aire. Esta área depende de los parámetros geométricos de entrada. Los valores a y b corresponden al área de flujo en el intercambiador, cuyas dimensiones corresponden a la longitud máxima de 0,43m (430mm).

Ecuación 17. Fórmula de área De circulación de aire
Para intercambiadores de flujo cruzado

$$F = ab - z_1 b \left(d_o + \frac{2flft}{fp} \right)$$

Fuente: PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy and CARVAJAL-MARISCAL, Ignacio. Handbook for Transversely finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. 1-178 p. ISBN 9780128043974

$$F = 0,43m \times 0,2m - 20 \times 0,2m \left(0,01m + \frac{2 \times 0,02m \times 0,00005m}{0,002m} \right)$$

$$F = 0,042m^2$$

Con este valor calculado, se procede a averiguar la velocidad del fluido usando la siguiente fórmula.

$$V_{aire} = \frac{\dot{m}_{aire} \rho_{aire}^{-1}}{F} = \frac{0,39 \frac{kg}{s} \times \left(1,184 \frac{kg}{m^3}\right)^{-1}}{0,064m^2} = 7,8426 \frac{m}{s}$$

Con esta velocidad, se procede al cálculo del número de Reynolds para el aire.

$$Re_{aire} = \frac{V_{aire} d_o}{\nu_{aire}} = \frac{7,8426 \frac{m}{s} \times 0,01m}{1,56 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_{aire} = 5020,8768$$

Después de hallar estas cifras numéricas, es posible hallar el coeficiente convectivo teórico de transferencia de calor para el aire.

$$h_{ext} = 1,13 \times 0,8535 \times 0,0155 \times \frac{0,02551 \frac{W}{mK}}{0,01m} \times 5020,8768^{0,8363} \times 0,7296^{0,33}$$

$$h_{ext} = 42,81 \frac{W}{m^2K}$$

Para hallar el coeficiente real de transferencia de calor externo, es necesario aplicar unos factores de corrección, dados por la siguiente ecuación.

Ecuación 18. Fórmula para el Coeficiente convectivo del aire

$$h_{aire} = h_{ext} \left(\frac{A_r}{A} E \mu_r \Psi_E + \frac{A_t}{A} \right)$$

Fuente: PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy and CARVAJAL-MARISCAL, Ignacio. Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. 1-178 p. ISBN 9780128043974

Primeramente, se deben determinar otro par de relaciones de área, cuyos valores ya se encuentran calculados.

$$\frac{A_{r1}}{A_1} = \frac{A_r}{A} = \frac{0,3235m^2}{0,3541m^2} = 0,9135$$

$$\frac{A_{t1}}{A_1} = \frac{A_t}{A} = \frac{0,0306m^2}{0,3541m^2} = 0,0864$$

El paso siguiente, se halla la eficiencia de la aleta (E), mediante esta ecuación.

$$E = \frac{\tanh(\beta l'_r)}{\beta l'_r}$$

Para tal fin, se hallan el coeficiente beta de la aleta y las longitudes, equivalente y convencional de la aleta. La conductividad térmica del aluminio se toma con el valor de 225W/mK⁴²

$$\beta = \frac{\sqrt{2h_{ext}}}{\sqrt{ftk_{Al}}} = \frac{\sqrt{2 \times 42,81 \frac{W}{m^2K}}}{\sqrt{0,00005m \times 225 \frac{W}{mK}}} = 9,2527m^{-1}$$

Luego se hallan los parámetros de corrección para longitud equivalente.

⁴² PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy and CARVAJAL-MARISCAL, Ignacio. Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. p. 92. ISBN 9780128043974

$$l_r = \frac{1,13fl - d_o}{2} = \frac{1,13 \times 0,02m - 0,01m}{2} = 0,0063m$$

Con esta longitud equivalente, se busca la longitud convencional de la aleta.

$$l'_r = l_r \left[1 + \left(0,191 + 0,054 \times \frac{1,13fl}{d_o} \right) \ln \left(\frac{1,13fl}{d_o} \right) \right]$$

$$l'_r = l_r \left[1 + \left(0,191 + 0,054 \times \frac{1,13 \times 0,02m}{0,01m} \right) \ln \left(\frac{1,13 \times 0,02m}{0,01m} \right) \right] = 0,0079m$$

Finalmente, se procede a calcular la eficiencia de aleta.

$$E = \frac{\tanh(\beta l'_r)}{\beta l'_r} = \frac{\tanh(9,2527m^{-1} \times 0,0079m)}{9,2527m^{-1} \times 0,0079m} = 0,9982$$

Para el factor de corrección, se usa la siguiente fórmula.

$$\Psi_E = 1 - 0,016 \left(\frac{1,13fl}{d_o} - 1 \right) [1 + \tanh(2\beta l_r - 1)]$$

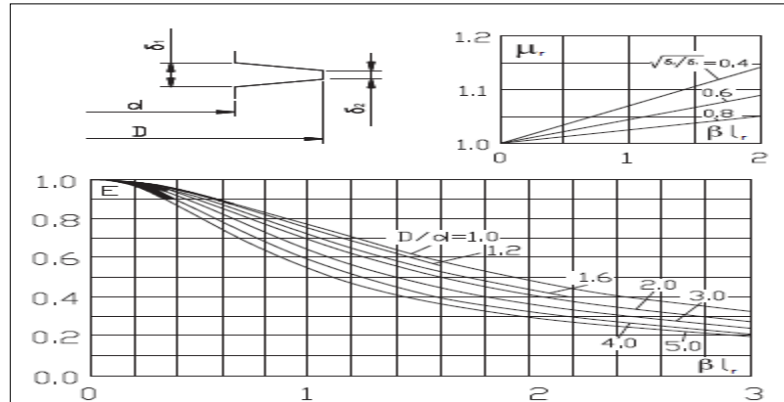
Se soluciona mediante estos valores numéricos.

$$\Psi_E = 1 - 0,016 \left(\frac{1,13 \times 0,02m}{0,01m} - 1 \right) [1 + \tanh(2 \times 16,68m^{-1} \times 0,0063m - 1)]$$

$$\Psi_E = 0,994$$

El coeficiente μ_r , el cual relaciona la eficiencia del flujo de aire a través de las aletas del intercambiador, es obtenido por medio de tablas normalizadas, dependiendo de la geometría de la aleta y el coeficiente convectivo teórico.

Imagen 48. Gráfica de coeficiente μ_r



Fuente: PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy and CARVAJAL-MARISCAL, Ignacio. Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. p. 92. ISBN 9780128043974

Se efectúa el cruce de líneas entre los parámetros βl_r y D/d_o para encontrar el valor numérico de μ_r .

$$\beta l_r = 9,2527 m^{-1} \times 0,0063 m = 0,0728$$

$$\frac{D}{d_o} = \frac{1,13 \times 0,02 m}{0,01 m} = 2,26$$

Con el cruce de estos valores, se puede concluir que el coeficiente μ_r es igual a 1, con el cual finaliza el proceso de corrección para el coeficiente convectivo de transferencia de calor para el lado externo.

$$\mu_r = 1$$

La solución final del coeficiente convectivo para el aire, con el total de parámetros calculados.

$$h_{aire} = 42,81 \frac{W}{m^2 K} \times (0,9133 \times 0,9979 \times 1 \times 0,994 + 0,0866)$$

$$h_{aire} = 42,51 \frac{W}{m^2 K}$$

Este es el valor real del coeficiente convectivo de transferencia de calor para el aire, cuya cifra es 42,51 W/m²K.

5.4.5.3 Coeficiente convectivo de transferencia de calor del refrigerante.

El proceso de obtención de este valor numérico inicia con el cálculo del número de Reynolds al interior de la tubería.

$$Re_{lr} = \frac{\rho V d_i}{\mu} = \frac{992,1 \frac{kg}{m^3} \times 1,83 \frac{m}{s} \times 0,009m}{0,000653 \frac{kg}{ms}}$$

$$Re_{lr} = 25022,8$$

Esto significa que el flujo al interior de la tubería es de tipo turbulento, por lo tanto, es necesario hallar el factor de fricción para estas condiciones de flujo. Se emplea la correlación experimental de Petukhov, que es válida para números de Reynolds entre 3000 y 5'000.000.

Ecuación 19. Correlación de Petukhov para factor de Fricción

$$f = (0,790 \times \ln Re_{lr} - 1,64)^{-2} \quad 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$$

Fuente: BERGMAN, T. L. and INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. P.522 ISBN 0470501979

$$f = (0,790 \times \ln(25022,8) - 1,64)^{-2}$$

$$f = 0,0247$$

Con este factor de fricción, se halla el número de Nusselt, el cual determinará el coeficiente convectivo de transferencia de calor para el refrigerante.

Ecuación 20. Correlación de Petukhov para número de Nusselt

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re_{lr} Pr}{1,07 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (0,5 \leq Pr \leq 2000)(3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6)$$

Fuente: ÇENGEL, Yunus A. Heat transfer. 2. ed., internet. ed. ed. Boston [u.a.]: McGraw-Hill, 2003. ISBN 0071151508. P. 441

$$Nu = \frac{\left(\frac{0,0247}{8}\right) \times 25022,8 \times 4,32}{1,07 + 12,7 \left(\frac{0,0247}{8}\right)^{0,5} \left(4,32^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$Nu = 149,32$$

Con este número, es posible hallar el coeficiente convectivo de transferencia de calor para el lado refrigerante.

$$Nu = \frac{h_{lr} d_i}{k_{lr}} \rightarrow h_{lr} = \frac{Nu k_{lr}}{d_i} = \frac{149,32 \times 0,631 \frac{Wm}{K}}{0,009m}$$

$$h_{lr} = 10469,5 \frac{W}{m^2 K}$$

El valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor para el refrigerante es de 10469,5 W/m²C.

5.4.5.4 Resistencia de muro. Para este parámetro, se usa la resistencia térmica al contacto del material de intercambiador; en este caso, éste está hecho enteramente en aluminio, por lo cual se toma el valor de resistencia perteneciente al aluminio, cuyo medio de interface es el aire.

Imagen 49. Tabla de valores para resistencia de contacto para metales

Thermal Resistance, $R''_{t,c} \times 10^4$ (m ² ·K/W)				
(a) Vacuum Interface			(b) Interfacial Fluid	
Contact pressure	100 kN/m ²	10,000 kN/m ²	Air	2.75
Stainless steel	6–25	0.7–4.0	Helium	1.05
Copper	1–10	0.1–0.5	Hydrogen	0.720
Magnesium	1.5–3.5	0.2–0.4	Silicone oil	0.525
Aluminum	1.5–5.0	0.2–0.4	Glycerine	0.265

Fuente: BERGMAN, T. L. and INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. p.118.ISBN 0470501979

El valor arrojado según la tabla mostrada es de 2,75X10⁻⁴m²K/W

$$R_{wall} = R_{ct Al} = 2,75 \times 10^{-4} \frac{m^2 K}{W}$$

5.4.5.5 Solución del coeficiente global de transferencia de calor. Con el total de valores críticos obtenidos, el proceso finaliza con el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor vigente para la totalidad del intercambiador.

$$U = \frac{1}{12,5248 \times \frac{1}{10469,5 \frac{W}{m^2K}} + 12,5248 \times 2,75 \times 10^{-4} \frac{m^2K}{W} + \frac{1}{49,7892 \frac{W}{m^2K}}}$$

$$U = 35,5 \frac{W}{m^2K}$$

El valor del coeficiente global es de $35,5W/m^2K$, el cual se encuentra cercano a los valores representativos de este coeficiente para este tipo de intercambiadores de calor. Ya obtenido este valor numérico, se procede a hallar el parámetro más importante del intercambiador: El área.

Imagen 50. Valores representativos para coeficiente global de transferencia de calor

Fluid Combination	U ($W/m^2 \cdot K$)
Water to water	850–1700
Water to oil	110–350
Steam condenser (water in tubes)	1000–6000
Ammonia condenser (water in tubes)	800–1400
Alcohol condenser (water in tubes)	250–700
Finned-tube heat exchanger (water in tubes, air in cross flow)	25–50

Fuente: BERGMAN, T. L. and INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. p.710. ISBN 0470501979

5.4.6 Área del intercambiador de calor. Hallado el coeficiente global de transferencia de calor, se procede a hallar el área total de superficie, con el fin de general las características finales del intercambiador. El área se obtiene despejando la respectiva variable de la ecuación de gobierno.

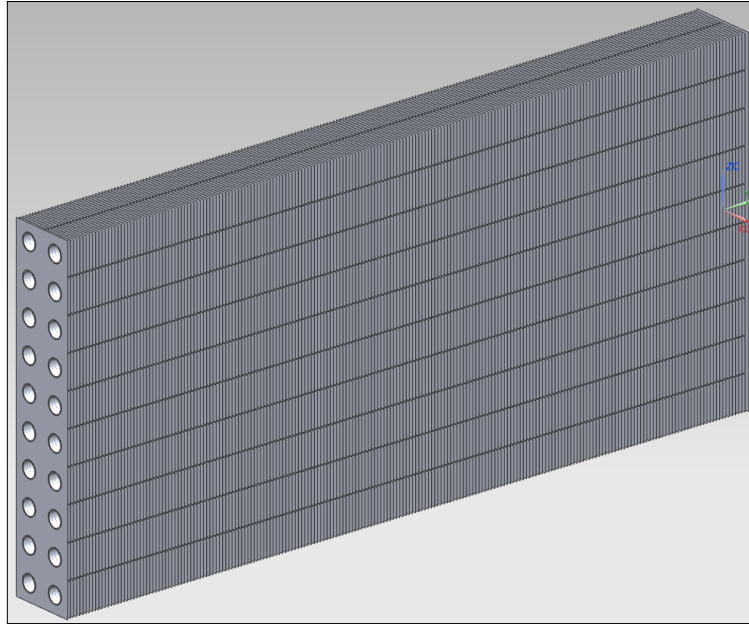
$$\dot{Q}_b = UA\Delta T_m \rightarrow A = \frac{\dot{Q}_b}{U\Delta T_m} = \frac{8,64 \times 10^3 W}{42,51 \frac{W}{m^2K} \times (18,88)K}$$

$$A = 12,88m^2$$

Ya encontrado el valor de área real, se procede al cálculo de otros datos críticos para el diseño del intercambiador.

5.4.7 Parámetros finales. Después de verificar que el intercambiador de calor se ajusta a los valores representativos teóricos, se procede al modelado de la sección interna de éste.

Imagen 51. Sección interna del Intercambiador de calor



Fuente: elaboración propia

El paso siguiente es determinar la capacidad del refrigerante al interior del intercambiador y las caídas de presión en el lado refrigerante, cuyo valor numérico será posteriormente usado para la selección de la bomba hidráulica.

5.4.7.1 Caída de presión. Este valor es requerido con el fin de determinar la bomba hidráulica que moverá el fluido de refrigeración, junto con las especificaciones de tubería, las cuales se encuentran en el numeral 5.4.3.2. Esto sólo aplica para la sección de tubería del intercambiador. Para tal fin, se usa la siguiente expresión matemática.

Ecuación 21. Caídas de presión intercambiador de calor

$$\Delta P_{he} = \zeta_{fr} \frac{Lt}{d_i} \cdot \frac{\rho_{lr}(V_{lr})^2}{2}$$

Fuente: PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy and CARVAJAL-MARISCAL, Ignacio. Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. p. 92. ISBN 9780128043974

Primeramente, se aplica el factor de corrección de fricción de fluido con respecto a la superficie del tubo (ζ_{fr}) mediante esta expresión.

$$\zeta_{fr} = \frac{1}{4 \left(\log \left(3,7 \frac{d_i}{\Xi} \right) \right)^2}$$

El valor de la rugosidad para el aluminio⁴³ es de $1,5 \times 10^{-5}m$

$$\zeta_{fr} = \frac{1}{4 \left(\log \left(3,7 \frac{0,009m}{1,5 \times 10^{-5}m} \right) \right)^2} = 0,0511$$

$$\Delta P_{he} = 0,0511 \times \frac{0,2m}{0,009m} \times \frac{992,1 \frac{kg}{m^3} \times \left(1,83 \frac{m}{s} \right)^2}{2} = 1889,68 Pa$$

Esta es la máxima caída de presión global del sistema de intercambio de calor, cuyo valor es 1889,68 Pa.

5.4.7.2 Cantidad del refrigerante en intercambiador. Para saber las dimensiones de las cavidades contenedoras de refrigerante, las cuales están ubicadas a los lados del intercambiador. El volumen total de refrigerante en el intercambiador se da con el volumen interno del tubo de refrigeración por el número de unidades presente.

$$V_{HE} = \frac{\pi}{4} d_i^2 L_{ct} z_1 = \frac{\pi}{4} \times (0,009m)^2 \times 0,43m \times 20 = 5,47 \times 10^{-4} m^3$$

⁴³ Íbid; p. 45

$$V_{HE} = 0,5471L \approx 0,6L$$

Este valor es muy parecido al que se maneja en intercambiadores de calor de este tipo. Con la mitad de este volumen, se halla el ancho del compartimento de almacenamiento en un solo lado del intercambiador, ya que existe uno igual al otro lado de éste. Las dimensiones de largo y alto se toman con referencia al ancho y espesor del área de transferencia de calor, tomando un grosor de pared de 3mm.

$$w_{sp} = \frac{0,3 \times 0,5 \times 0,0006m^3}{0,197m \times 0,035m} = 0,04115m \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 41,15mm \approx 42mm$$

El ancho restante del compartimento de refrigerante es de 42mm por lado. Con la adición del grosor de pared de 3mm, se obtiene un total de 45mm por lado del intercambiador. Las dimensiones de los compartimentos de encuentran en la tabla mostrada en la sección de especificaciones finales.

Imagen 52. Compartimiento lateral de Refrigerante del intercambiador



Fuente: elaboración propia.

Las conexiones de tubería externa son de un diámetro de 5/8" (15,88mm), siendo el diámetro usado para los tubos de refrigeración de las baterías de los módulos de batería, las cuales se conectarán con tubería flexible de silicona. Estos componentes se detallan en la sección del subsistema hidráulico.

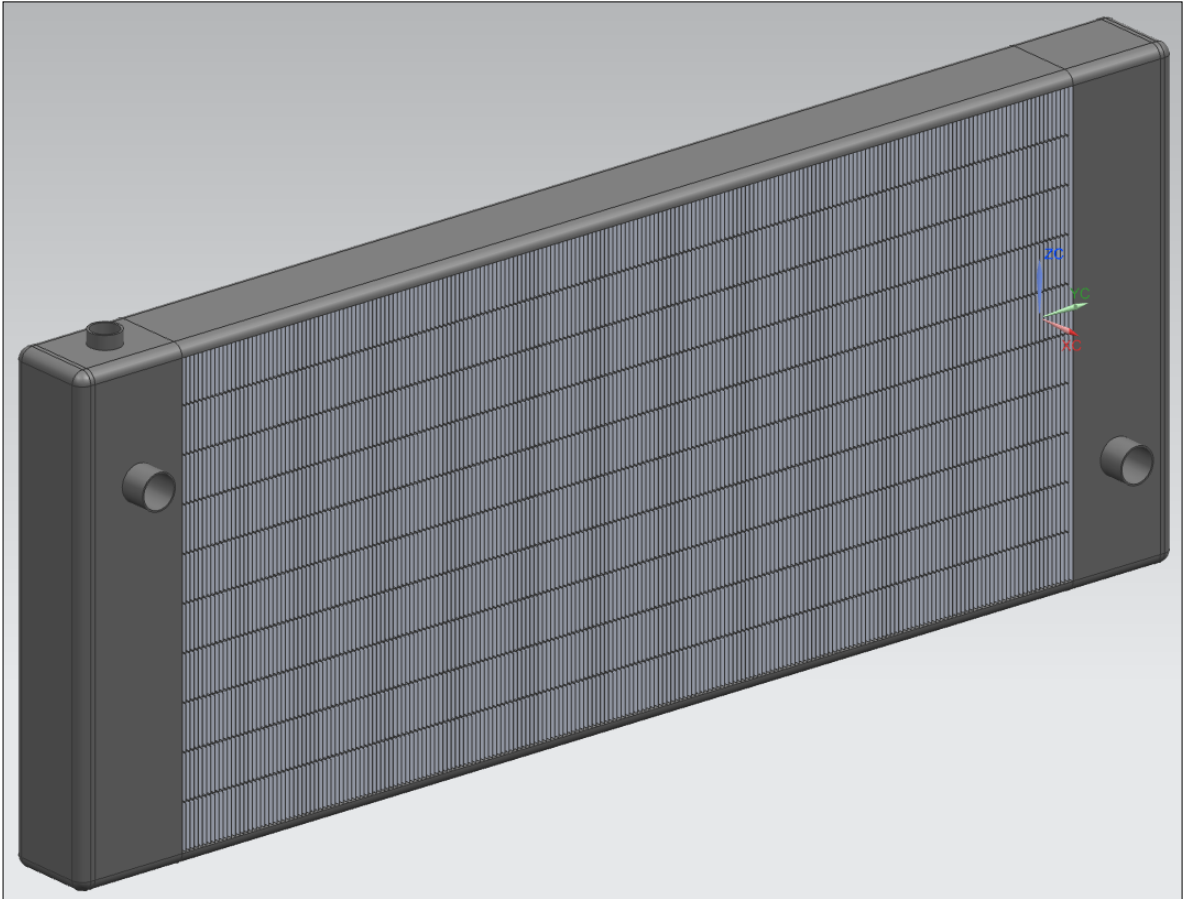
5.4.8 Especificaciones finales. Después de la solución de la ecuación de gobierno y la definición de los parámetros geométricos y térmicos correspondientes, las especificaciones del intercambiador de calor se muestran en la siguiente tabla, dando por finalizado el proceso de diseño del presente subsistema.

Tabla 12. Especificaciones finales del intercambiador

Intercambiador de calor		
Criterio	Valor numérico	Unidad de medida
Altura total (sin tapa de llenado)	210	mm
Longitud total	430	mm
Espesor total	40	mm
Accesos de fluido	2	/
Diámetro de accesos	15.88	mm
Base del área de transferencia	430	mm
Altura del área de transferencia	200	mm
Diámetro exterior de tubería	10	mm
Espesor de pared	1	mm
Longitud de tubería	430	mm
Distribución de tubos	Lineal	/
Nº tubos	20	/
Espaciamiento entre tubos (Equidistante)	20	mm
Tipo de aleta	Cuadrada	/
Nº Total de aletas	2140	/
Lado de aleta	20 X 20	mm
Espesor de Aleta	0.05	mm
Paso de aletas	2	mm
Caída de presión	1.88968	kPa
Montaje	Horizontal	/
Ubicación	Parte trasera	/
Capacidad del refrigerante	0.6	L
Coefficiente de transferencia	35.5	W/m ² K

Fuente: elaboración propia

Imagen 53. Intercambiador de calor



Fuente: elaboración propia

5.5 SUBSISTEMA DE CIRCULACIÓN DE FLUIDO DE REFRIGERACIÓN

El siguiente paso de ejecución del presente diseño corresponde al diseño del circuito por el cual va a circular el refrigerante. Con el fin de transportar el fluido de refrigeración, se requiere de tres componentes básicos para cumplir con esta función, los cuales se mencionan a continuación.

5.5.1 Caudal del refrigerante. La variable principal de gobierno en un sistema hidráulico se da mediante el flujo volumétrico del sistema, el cual regirá las velocidades del fluido y los diámetros de tubería en cada una de las secciones planteadas. Dado que la masa y el volumen se relacionan mediante la densidad, también los flujos másico y volumétrico cumplen con la misma relación.

$$\dot{V}_{tr} = \frac{\dot{m}_{tr}}{\rho_{tr}} = \frac{0,1033 \frac{kg}{s}}{992,1 \frac{kg}{m^3}}$$

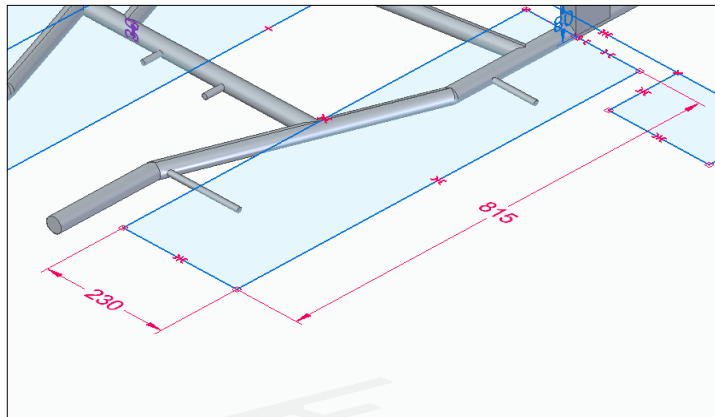
$$\dot{V}_{tr} = 10,41 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Con el caudal hallado, se procede al tratamiento del subsistema en las secciones mostradas a continuación.

5.5.2 Tubería Rígida. Son los medios de transporte del fluido de refrigeración entre los subsistemas de potencia e intercambio de calor. Con el fin de hallar los parámetros de funcionamiento, se requieren ciertos datos teóricos que ayudan a obtener los componentes más adecuados para el diseño.

5.5.2.1 Espacio total disponible para compartimiento. Las propiedades de tuberías en esta sección del subsistema son las más críticas, ya que esta es la zona de menor diámetro posible para las tuberías. Para su dimensionamiento correcto se toma como referencia las máximas dimensiones posibles del compartimiento de las baterías, cuyas dimensiones son 815 X 230mm por módulo.

Imagen 54. Máximo Espacio disponible para Compartimientos de batería del kart



Fuente: elaboración propia

5.5.2.2 Velocidad mínima de fluido y selección de diámetro hidráulico.

La industria suele manejar un tope mínimo de 0,6 m/s⁴⁴ para el parámetro de velocidad mínima, con el fin de evitar formación de sedimentos y garantizar un flujo de calidad del correspondiente fluido, asumiendo que el refrigerante está libre de impurezas. Con estas condiciones definidas, se determina el valor máximo de diámetro, el cual sirve de referencia para el diámetro interno, con el fin de orientar el proceso de selección de las tuberías, en especial las del sector rígido.

$$D = \sqrt{\frac{4V_{tr}}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \times 10,41 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \times 0,6 \frac{m}{s}}} = 0,0148m \approx 0,015m = 15mm$$

Con este valor numérico, se procede a la selección de tuberías y diseños asociados para los dos tipos de tubería que maneja el sistema de gestión térmica. Teniendo en cuenta estas dimensiones, adicionando las del módulo de batería y la velocidad mínima de flujo, se selecciona como referencia una tubería de cobre tipo K con diámetro nominal de 5/8" (15,88mm) con grosor de pared de 1,44mm (ver anexo C) sobre el cual se calcula el perfil de la sección transversal de la tubería. Con este perfil seleccionado, se calcula la velocidad real del fluido.

$$V_{ht} = \frac{V_{tr}}{\frac{\pi}{4} D_h^2} = \frac{10,41 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} \times (0,01464m)^2} = 0,6189 \frac{m}{s}$$

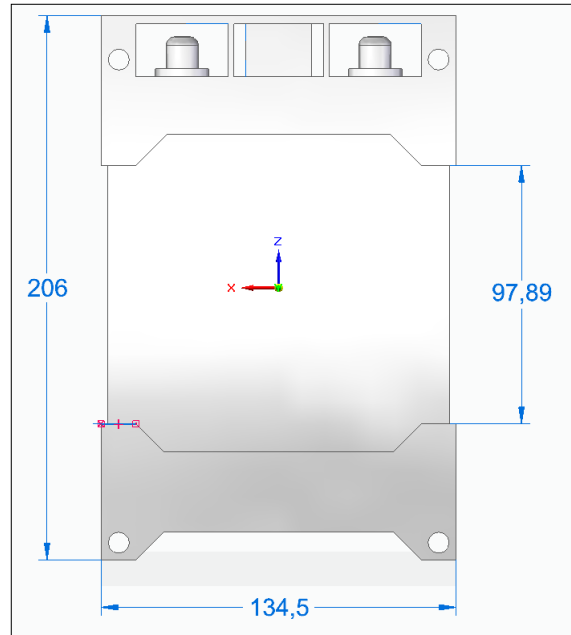
5.5.2.3 Sección transversal del perfil rectangular. Debido a la forma prismática de las celdas a refrigerar, es mejor usar un perfil de tubería de tipo rectangular, con el fin de obtener una mejor conducción de calor y una mejor distribución de espacio. Por lo tanto, se busca la mejor relación de base y altura que dé como resultado un diámetro hidráulico de 15,88mm, el cual es equivalente a la tubería tipo K de referencia.

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{ab}{2(a+b)}$$

Para hallar las dimensiones de la sección transversal, se fija una de las dimensiones de acuerdo con las dimensiones del área metálica de la batería, la cual es igual a 97,8mm, a la cual se resta dos veces la cifra del espesor de la tubería de referencia, el cual es de 1,24mm.

⁴⁴ SASKATCHEWAN ENVIRONMENT. Water Pipeline Design Guidelines. Regina, SK: 2004.

Imagen 55. Dimensiones básicas de Celda electroquímica



Fuente: elaboración propia

Se continúa con el cálculo de la dimensión restante, tanto para la parte interna de la tubería.

$$b = \frac{-2D_h a}{2D_h - a}$$

$$si \ a = a_i = 0,0978m - 0,00124m \times 2 = 0,09532m$$

$$b_i = \frac{-2 \times 0,01464m \times 0,09532m}{2 \times 0,09532m - 0,01464m}$$

$$b_i = 0,04202m \times \left(\frac{1000mm}{1m} \right) = 42,02mm$$

Las dimensiones de la sección transversal interna de la tubería de refrigeración son 95,32mm X 42,02mm. Estos valores numéricos representan las dimensiones del diámetro hidráulico de 14,64mm sobre el cual se analizará el comportamiento del fluido y se hallarán las respectivas pérdidas menores y caídas de presión.

Para encontrar la dimensión faltante del tubo rectangular de refrigeración, la cual es la altura, ya se encuentra definida con un valor de 97,8mm; ésta se usará para

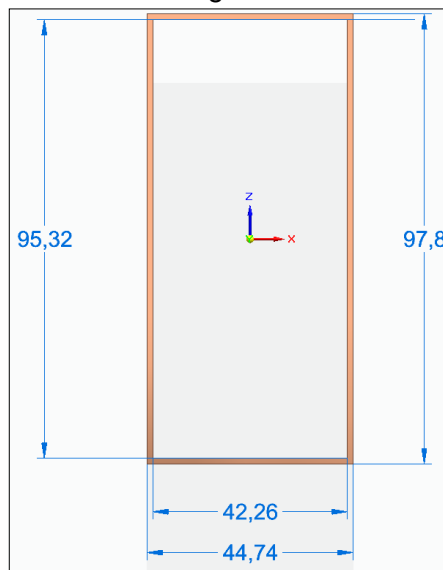
el cálculo de la longitud de la tubería, se adiciona dos veces el espesor definido de 1,24mm al ancho previamente calculado.

$$a_o = 97,8mm$$

$$b_o = 42,02mm + 1,24mm \times 2 = 44,74mm$$

La sección transversal de la tubería en su parte exterior tiene una dimensiones de 97,8 mm X 44,74 mm.

Imagen 56. Sección transversal de Tubería de refrigeración

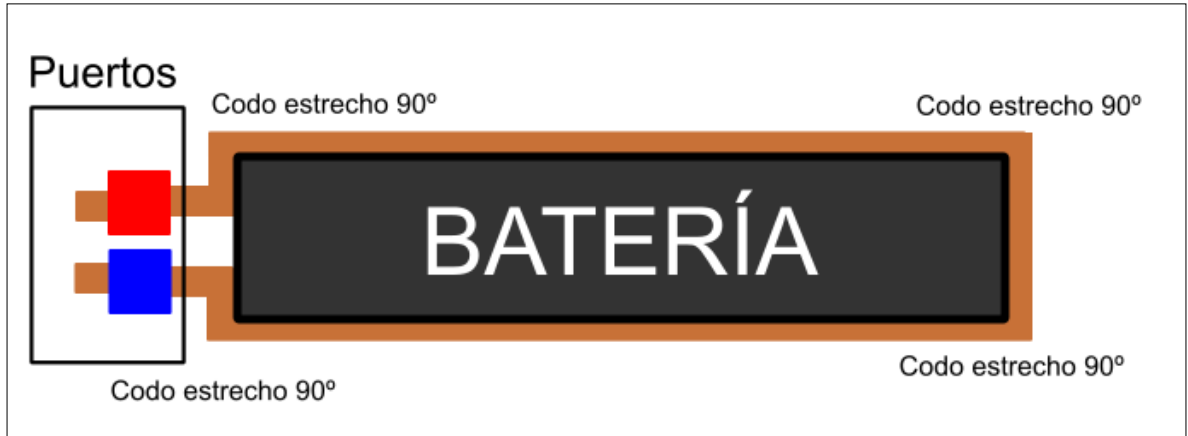


Fuente: elaboración propia

Con estos datos, se procede al modelado de la sección transversal de la tubería. Es necesario aclarar que éste es un componente hecho a medida, por lo tanto no se encuentra en ningún catálogo de perfiles rectangulares de cobre.

5.5.2.4 Longitud de tubería. La longitud de la unidad de tubería en esta sección se da por la multiplicación del perímetro de la sección metálica del módulo de batería, más la longitud equivalente de los codos de 90° que permiten el contacto de las superficies de batería, más la inclusión de las conexiones al puerto de distribución del refrigerante.

Imagen 57. Propuesta de tubería rígida para refrigeración de batería



Fuente: elaboración propia

Las dimensiones del área metálica del módulo de batería son 586mm X 129,5mm. Con estos datos, se busca una configuración de tubería de refrigeración que pueda cubrir la mayor área posible. Se emplean ciertas medidas, tales como la distancia de separación entre entrada y salida, y la longitud de conexión entre el puerto y la tubería rígida.

$$L_{tb} = \frac{b_o}{2} + P_b + L_{pc} + L_{e90}N_{e90} - (2b_o + Cl)$$

Donde:

- L_{tb} = Longitud total de tubería por módulo de batería.
- b_o = Ancho externo de tubería.
- P_b = Perímetro de batería.
- L_{pc} = Longitud de conexión a puerto, escogida a criterio del diseñador, considerando las limitaciones de espacio, en un valor de 11,5mm

$$L_{pc} = 11,5mm \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 0,0115m$$

- L_{e90} = Longitud equivalente de codos, equivalente a b_o .

$$L_{e90} = b_o = 0,04474m$$

- N_{e90} = Número de codos en tubería rígida.

$$N_{e90} = 6$$

- Cl = Distancia entre centros de las conexiones de puerto, resultado de la suma del ancho exterior de tubería y la separación de extremos, cuyo valor numérico es de 20,05mm.

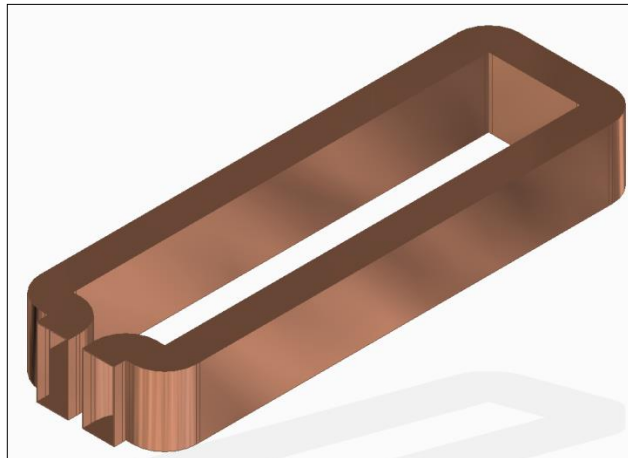
$$Cl = 0,04474m + 0,02005m = 0,06479m$$

Se procede al cálculo de la longitud de módulo.

$$L_{tb} = \frac{0,04474m}{2} + 2 \times (0,586m + 0,1295m) + 0,0115m + (0,04474m \times 6) - ((2 \times 0,04474m) + 0,06479m)$$

$$L_{tb} = 1,58m$$

Imagen 58. Tubería de refrigeración



Fuente: elaboración propia

Para el cálculo de las pérdidas, se multiplica la longitud dada por el número de tuberías, el cual es de 2, ya que el comportamiento se analiza de forma total.

$$L = L_{tb}N_{tb} = 1,58m \times 2 = 3,16m$$

Con el cálculo de la longitud total de tubería rígida, el cual es de 2,7m, se procede a averiguar las pérdidas hidráulicas de esta sección de tubería.

5.5.2.5 Comportamiento de tubería rígida. El siguiente paso es el cálculo del comportamiento de la tubería rígida, con el fin de determinar las pérdidas asociadas y las caídas de presión de esta sección. El primer paso es determinar el tipo de flujo al interior de la tubería mediante el número de Reynolds y el factor de fricción. Para estos cálculos, se usará el diámetro hidráulico de 14,64mm previamente estipulado.

$$Re_{ht} = \frac{\rho_{tr} V_{ht} D_h}{\mu_{tr}} = \frac{992,1 \frac{kg}{m^3} \times 0,6189 \frac{m}{s} \times 0,01464m}{0,000653 \frac{kg}{ms}}$$

$$Re_{ht} = 13767,88$$

Para encontrar el factor de fricción, se usa la misma correlación usada para el intercambiador de calor, ya que este número Reynolds hallado está dentro del rango válido de ésta.

$$f = (0,790 \times \ln(13767,88) - 1,64)^{-2} = 0,0288$$

Con estos valores, se procede al cálculo de caídas de presión y pérdidas por longitud, los cuales influyen en la posterior selección del propulsor del fluido.

$$h_f = f \left(\frac{L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2g} \right) = 0,0288 \times \left(\frac{3,16m}{0,01464m} \cdot \frac{(0,6189 \frac{m}{s})^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$h_f = 0,1141m$$

Con la pérdida de longitud, se procede al cálculo de las caídas de presión en esta sección de tubería, mediante el uso de la ya conocida ecuación de Bernoulli.

$$\Delta p_{ht} = \rho_{tr} g h_f = 992,1 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 0,1151m$$

$$\Delta p_{ht} = 1120,23Pa \times \left(\frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 1,12kPa$$

Estos valores numéricos serán usados posteriormente en la sección de medio impulsor de fluido.

5.5.3 Puerto de conexión. Debido a la existencia de múltiples tuberías de sección rígida y sólo una conexión de modo flexible, es necesario el diseño de un componente que pueda conecta las secciones rígida y flexible de la respectiva tubería.

La forma más clara de averiguar las dimensiones correctas para este elemento es mediante el espacio disponible para el módulo de batería y las dimensiones de entrada y salida de las tuberías rígida y flexible respectivamente. Como convención general, y a criterio del diseñador, se estandariza un grosor de pared de 2mm para el puerto.

$$t_{port} = 0,002m$$

5.5.3.1 Altura del puerto. Esta dimensión se toma de acuerdo con la dimensión externa de altura de las bocas de entrada y salida de la tubería rígida, la cual es de 97,8mm, incluyendo las condiciones de offset y grosor previamente estipuladas.

$$H_{port} = a_0 + 2t_{port} = 0,0978m + (2 \times 0,002m)$$

$$H_{port} = 0,1018m \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 101,8mm$$

5.5.3.2 Ancho del puerto. Esta mediada únicamente tiene en cuenta el ancho global del puerto de conexión, el cual toma en cuenta el grosor de pared previamente estipulado y la distancia de extremos entre la entrada y la salida de la tubería rígida, el cual es de 20,02mm.

$$W_{port} = (2b_0 \cdot 0,02002m) + 2t_{port}$$

$$W_{port} = (2 \times 0,04474m) + 0,02002m + (2 \times 0,002m)$$

$$W_{port} = 0,1135 \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 113,5mm$$

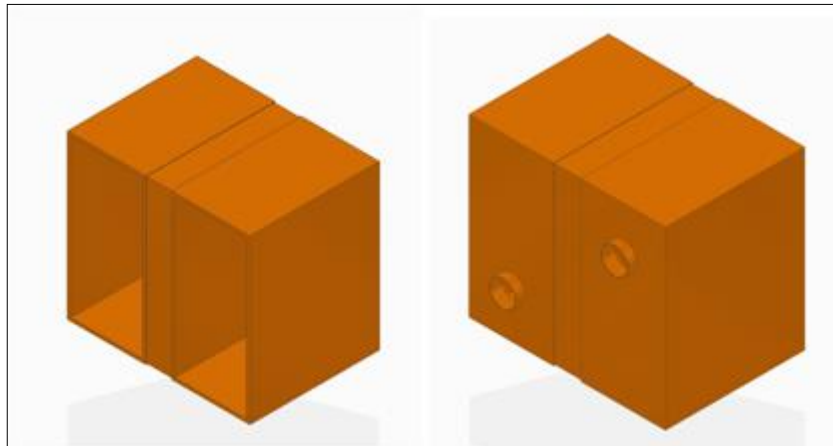
5.5.3.3 Base del puerto. Esta es la dimensión más restringida a nivel de espacio, ya que se encuentra próxima al límite disponible para el compartimiento de baterías. Cabe resaltar que este componente va a estar localizado afuera y de forma contigua al compartimiento. Se toma como límite crítico la longitud de 800mm, a la cual se restan los espacios de conexión entre tuberías, los cuales suman un total de 41mm.

$$L_{port} = 0,8m - 0,67848m - 0,041m$$

$$L_{port} = 0,0852m \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 80,52mm$$

5.5.3.4 Modelo final. Finalizado el proceso de dimensionamiento del puerto de conexión, se procede al modelamiento de éste. El material del cual se fabrica este puerto es fibra de vidrio, ya que se deben mantener separadas las temperaturas del líquido refrigerante antes y después del proceso de refrigeración.

Imagen 59. Puerto de conexión



Fuente: elaboración propia

Concluida la conexión entre tuberías, se prosigue al dimensionado y cálculo de tubería flexible, la cual servirá de conexión entre el intercambiador de calor y los módulos refrigerados de batería.

5.5.4 Tubería flexible. Esta es la sección de tubería más gruesa del presente sistema de gestión térmica. Comprende las secciones de conexión entre las baterías y el intercambiador de calor.

5.5.4.1 Material de tubería y dimensionamiento. La tubería usada puede ser de silicona, ya que no se manejan altas temperaturas que perjudiquen la tubería a nivel estructural, y son el material más usado en la industria del karting en este apartado. El diámetro interior usado de la tubería para este fin está comprendido entre los 13 y 15mm, con el fin de evitar al máximo posible los cambios de sección transversal, los cuales alterarían en gran manera el comportamiento del fluido. La tubería escogida tiene un diámetro interior de 15mm y un grosor de pared de 3mm, dando como resultado un diámetro exterior⁴⁵ de 21mm.

Imagen 60. Tubería flexible (Imagen de referencia)



Fuente: Acceleration Kart Racing. Silicone Radiator Hose. [Consultado el Oct 20, 2019] Disponible en: <https://www.accelerationkarting.com/siliconeradiatorhose.html>

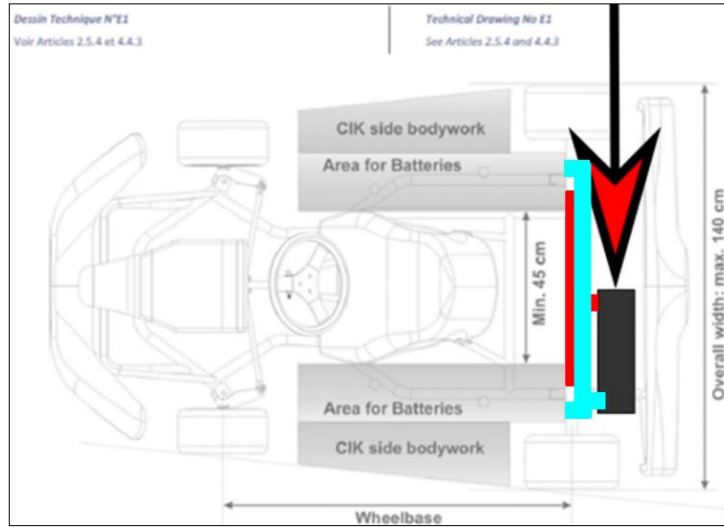
Con los datos de diámetro interior, se calcula la velocidad real del fluido en la tubería flexible, cuyo valor debe ser cercano a los 0,6 m/s.

$$V_{st} = \frac{V_{tr}}{\frac{\pi}{4} D_h^2} = \frac{10,41 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} \times (0,015m)^2} = 0,5896 \frac{m}{s}$$

La longitud de tubería sale por las dimensiones del chasis del vehículo y la respectiva localización de componentes. La longitud total de los tubos de transporte es igual a 2,48m.

⁴⁵ ADVANCED FLUID SOLUTIONS. 15mm I.D X 21mm O.D Clear Translucent Silicone Hose Pipe Tubing. [Consultado el Oct 20, 2019]. Disponible en: <https://www.advancedfluidsolutions.co.uk/15mm-id-x-21mm-od-clear-translucent-silicone-hose-pipe-tubing-2506-p.asp>

Imagen 61. Diagrama de tubería flexible en el kart



Fuente: elaboración propia

5.5.4.2 Comportamiento. Con esta última adición, se procede al cálculo de caídas de presión y pérdidas menores de esta sección, con el fin de hallar la altura de presión de la bomba impulsora del refrigerante. Se repite la metodología empleada con la tubería rígida, empezando con hallar el número de Reynolds y el factor de fricción del fluido refrigerante.

$$Re_{st} = \frac{\rho_{tr} V_{st} D_{i2}}{\mu_{tr}} = \frac{992,1 \frac{kg}{m^3} \times 0,5896 \frac{m}{s} \times 0,015m}{0,000653 \frac{kg}{ms}}$$

$$Re_{st} = 13437,46$$

$$f = (0,790 \times \ln(13437,46) - 1,64)^{-2} = 0,029$$

El proceso finaliza con el cálculo de pérdidas menores y caídas de presión.

$$h_f = f \left(\frac{L}{D_i} \cdot \frac{V^2}{2g} \right) = 0,029 \times \left(\frac{2,48m}{0,015m} \cdot \frac{\left(0,58 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) = 0,085m$$

$$\Delta p_{st} = \rho_{tr} g h_f = 992,1 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 0,085m$$

$$\Delta p_{st} = 889,21 \text{ Pa} \times \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} \right) = 0,88921 \text{ kPa}$$

5.5.5 Sistema de propulsión de fluido. La gran mayoría de sistemas de gestión térmica especializados en refrigeración líquida, el modo más utilizado para la propulsión del fluido de refrigeración está dado mediante el uso de una bomba hidráulica, la cual se calcula por sus respectiva ecuación de gobierno.

$$P = \frac{\rho_{lr} g h_p \dot{V}_{lr}}{\eta}$$

La altura de la bomba hidráulica está compuesta por la sumatoria de las pérdidas totales del sistema.

$$h_p = \Delta z + h_{ftotal} = 0,08461 \text{ m} + 0,085 \text{ m} + 0,1151 \text{ m}$$

$$h_p = 0,2848 \text{ m}$$

La bomba debe manejar la caída total de presión, la cual es la sumatoria de las caídas totales del sistema.

$$\Delta P_p = \Delta P_{he} + \Delta p_{ht} + \Delta p_{st} = 1889,68 \text{ Pa} + 1120,23 \text{ Pa} + 889,21 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_p = 3889,79 \text{ Pa}$$

En caso de desconocer el valor de la eficiencia de la bomba hidráulica, se asume una eficiencia del 70%, la cual se corrige durante el proceso de selección. La altura de presión de la bomba es el total de pérdidas menores de las tuberías rígida y flexible con sus respectivos accesorios.

$$P = \frac{992,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,2848 \text{ m} \times 10,41 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,7}$$

$$P = 0,41 \text{ W}$$

Este valor de potencia se da debido al bajo caudal del sistema, y a la baja altura de las tuberías de refrigeración. Con estos valores, adicionales al voltaje de operación, la caída de presión y el caudal establecido al principio de esta sección, se procede a la selección de la bomba eléctrica que moverá el fluido a través de todo el sistema. Las especificaciones técnicas de la bomba se encuentran en el anexo D.

Imagen 62. Bomba eléctrica EBP15



Fuente: Davies Craig. ELECTRIC BOOSTER PUMP (EBP15) (12V) SHORT - PART No: 9002. [Consultado el Oct 23, 2019]. Disponible en: <https://daviescraig.com.au/product/ebp15-electric-booster-pump-12v-9002/ebp15-electric-booster-pump-12v-9002>

Tabla 13. Comparación de especificaciones de bomba y cálculos de sistema

Criterio	Criterio Teórico	Criterio Seleccionado
Caudal (L/Min)	6.251830234	12.5
Presión (bar)	0.038897919	0.1
Máx.Temp.Operación (°C)	50	120
Máx. Tamaño manguera (mm)	15	19
Voltaje (V)	12	12

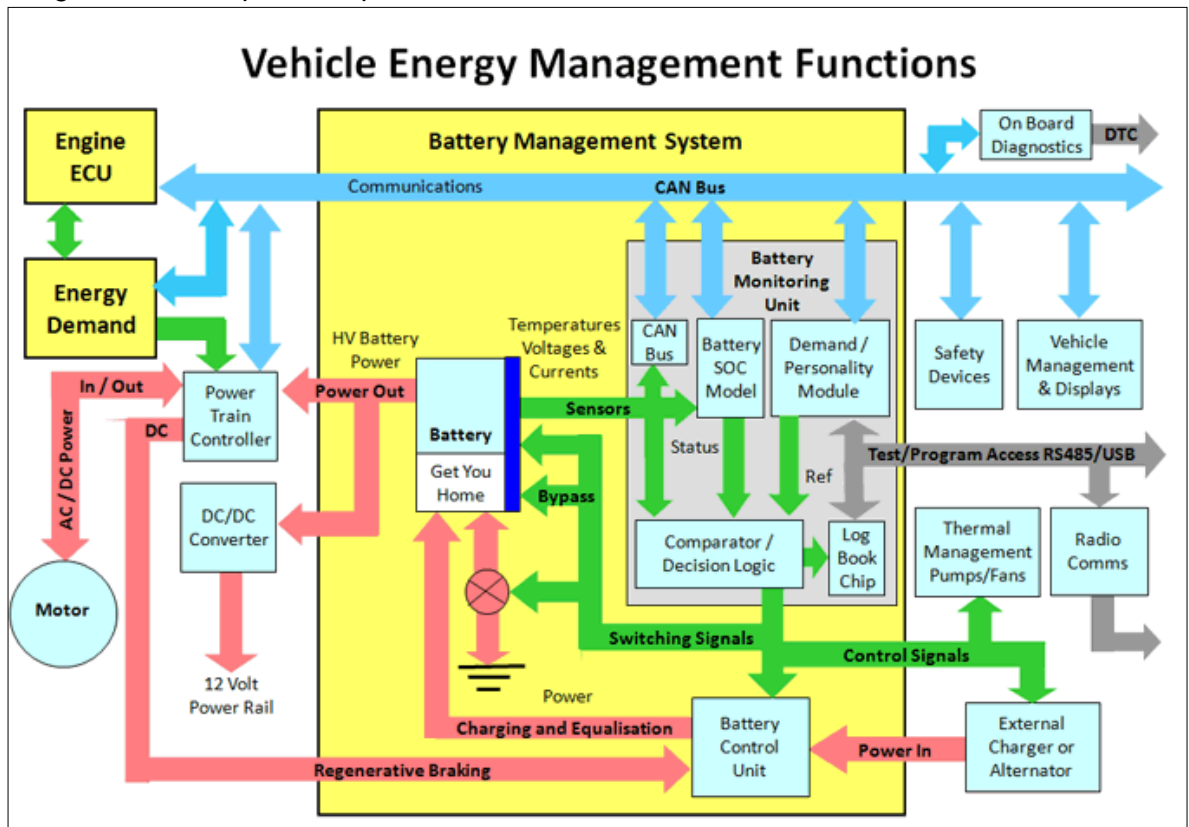
Fuente elaboración propia

5.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

Este subsistema se encarga de la operación del respectivo sistema de gestión térmica, este subsistema se selecciona en su totalidad, en relación directa a las propiedades y especificaciones del subsistema de potencia.

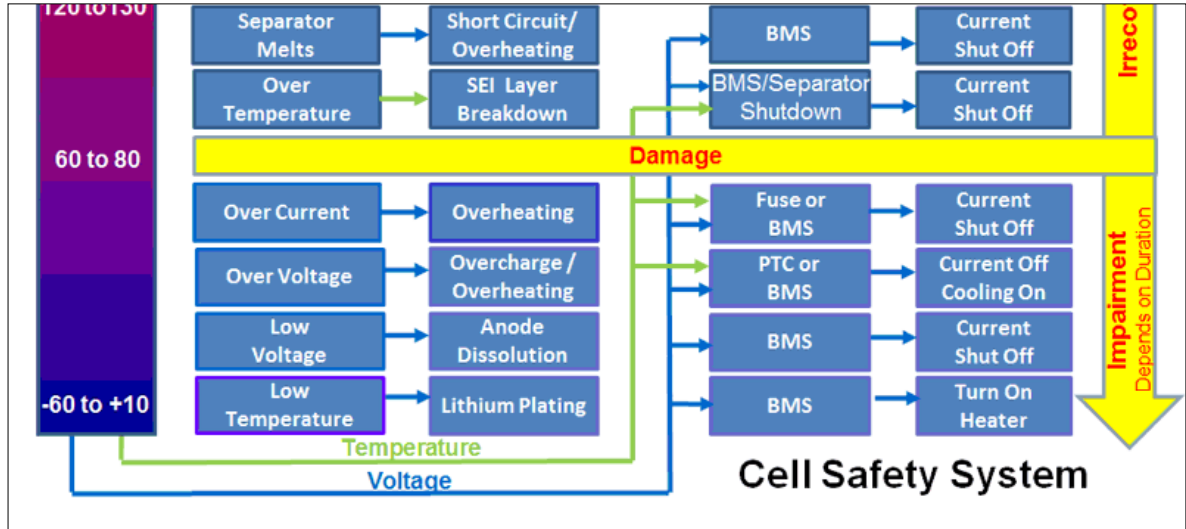
5.6.1 Descripción del proceso. El proceso inicia con la información proveniente de la unidad de gestión de batería, más conocida como BMS, la cual controla todas las variables de la batería, tales como estado de carga, balanceo de voltaje entre celdas, voltajes máximos y mínimos, cantidad de corriente drenada y el centro del proyecto, la temperatura de celda. La temperatura es tomada a través de sensores que ya viene incluidos en el BMS, ubicados en las celdas más críticas, las cuales son las celdas 1, 8 y 15 de cada uno de los dos módulos. Según la información de temperatura arrojada por estos sensores y, teniendo en cuenta las restricciones térmicas del sistema, la unidad de BMS puede reducir el flujo de corriente, modificar el estado de carga y, en casos críticos, desconectar la fuente de potencia de forma automática.

Imagen 63. Descripción de proceso de control del BMS en vehículo eléctrico



Fuente: Woodbank Communications Ltd. Battery Management and Monitoring Systems BMS. [Consultado el Oct 26,2019]. Disponible en: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>

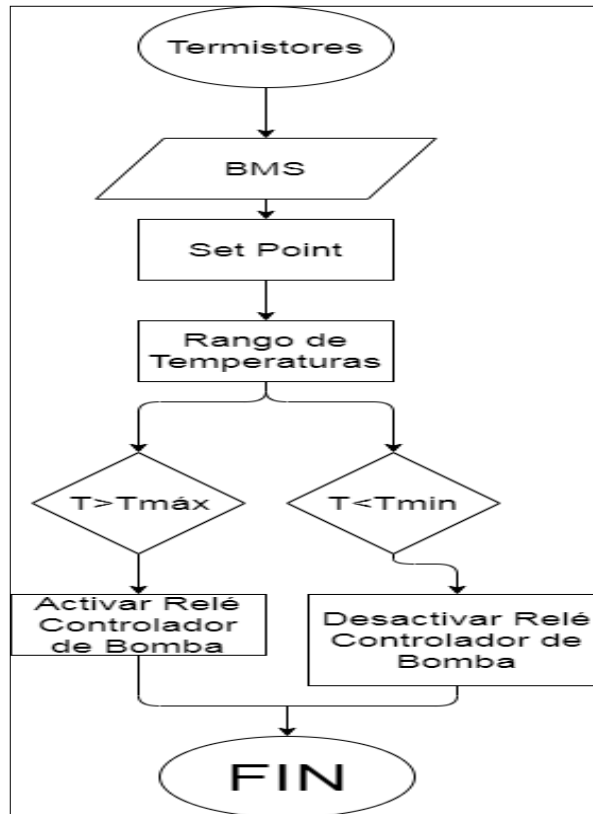
Imagen 64. Manejo térmico del BMS



Fuente: Woodbank Communications Ltd. Battery Management and Monitoring Systems BMS. [Consultado el Oct 26,2019]. Disponible en: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>

La modificación a aplicar en este control, es permitir el encendido del motor asociado a la bomba de circulación del fluido de refrigeración vía interruptor automático, con el fin de estabilizar la temperatura de las baterías en un punto tal que garantice una operación segura, pero cercana al punto crítico de rendimiento, obteniendo las mejores propiedades de potencia. Para este punto, se debe establecer un rango de temperaturas de activación, apagado y operación para el sistema, donde el subsistema de circulación de fluido pueda ser activado o desactivado con base a la información térmica provista. El tipo de control más adecuado para esta aplicación es el control tipo on-off, ya que no es necesario ajustar de forma constante el flujo volumétrico del fluido de refrigeración, además que es el tipo de control más básico en existencia y el más conveniente por el tipo de vehículo en el cual se aplica el sistema de gestión térmica. El proceso finaliza con la selección del interruptor automático y su respectiva configuración, el cual estará conectado en el circuito auxiliar de 12V mostrado en la imagen 11 del presente trabajo; este circuito eléctrico también incluye la conexión de la bomba eléctrica de circulación de fluido.

Imagen 65. Diagrama de flujo del control del Sistema



Fuente: elaboración propia

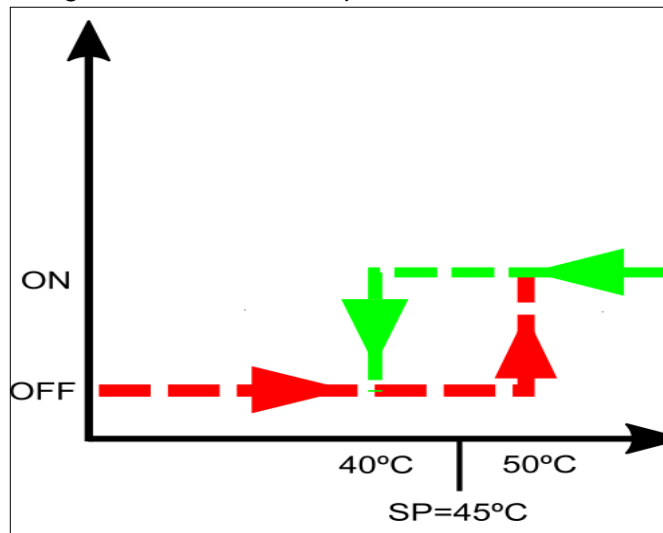
5.6.2 Parámetros de entrada. La información primordial para el diseño de este subsistema radica en tres datos asociados a temperatura, los cuales son el set point y las temperaturas de encendido y apagado, estas últimas conforman el rango de operación del sistema.

5.6.2.1 Set-point. Este es un valor crítico, sobre el cual se establece el rango de operación del sistema. El set point por sí solo no sirve para ejecutar el control, ya que se reduce a una cifra exacta, y la temperatura no suele mantenerse constante en una cifra fija por un considerable periodo de tiempo. Este valor es únicamente de referencia. El set-point del sistema de gestión térmica se programa a una temperatura de 45°C , ya que esta temperatura se encuentra entre la máxima temperatura de operación de las celdas y la máxima temperatura de operación óptima de estas.

5.6.2.2 Temperatura de encendido. Debido a que esta aplicación es especializada en rendimiento, se busca que la batería esté trabajando a una temperatura cercana a su umbral máximo, con el fin de explotar las mejores cualidades de ésta durante su funcionamiento. La temperatura de encendido del sistema debe ser de 48°C, la cual se encuentra 2°C por debajo de la temperatura máxima de seguridad de celda, la cual es de 50°C; por lo tanto, el solenoide debe activar el motor de la bomba apenas alguno de los sensores de temperatura alcance los 48°C.

5.6.2.3 Temperatura de apagado. El sistema de gestión térmica no puede estar eternamente encendido, ya que puede repercutir en el consumo energético de las fuentes de potencia, alejándolas de la ventana máxima de potencia, la cual es de 40°C. Por esta razón, si los sensores de temperatura detectan un valor inferior a este valor, el controlador on-off debe cortar el suministro energético al motor de la bomba hidráulica.

Imagen 66. Ventana de operación del controlador

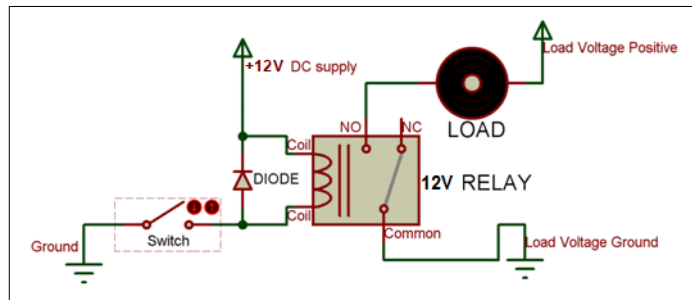


Fuente: elaboración propia

5.6.3 Controlador On-Off. Este controlador es el encargado de encender el motor auxiliar que mueva la bomba de circulación de fluido, la cual está en función de la información de temperatura dada por el BMS. Para el correcto funcionamiento del sistema, se selecciona un punto crítico, conocidos como set-point, sobre el cual se establece el rango de operación del sistema de gestión térmica, cumpliendo la función de un termostato. Este es el sistema de control más simple que existe, ya que solo tiene un modo de operación binario, debido a que puede estar encendido (1) o apagado (0). Este método es el más adecuado para esta aplicación, ya que no es necesario controlar las rpm del motor según la temperatura, ya que ese valor es fijo.

5.6.3.1 Funcionamiento del controlador. La información concerniente a la temperatura proviene de termistores de tipo ADC; es decir, que convierten variables análogas, la temperatura de celda en este caso, en señales digitales representadas en un voltaje de referencia, el cual envía el comando hacia el relé activador del servo-motor de la bomba hidráulica, el cual pone a circular el fluido de refrigeración. El voltaje de esta señal suele ser de 5VDC por lo general, pero se usará un voltaje de 12VDC, para evitar el cambio excesivo de diferencias de potencial, los cuales pueden ocasionar daños en el circuito.

Imagen 67. Esquema de funcionamiento de Controlador on-off



Fuente: COMPONENTS,101. 12 Relay Switch Pinout, Equivalent, Driver Circuit & Datasheet. [Consultado El Nov 11,2019]. Disponible en: <https://components101.com/switches/12v-relay>

Con esta información, se le asignan valores de voltaje a los valores críticos de temperatura

5.6.3.2 Selección de relé controlador. El relé controlador se selecciona según el voltaje de 12VDC del circuito de emergencia (ver imagen 11), el cual controla los voltajes bajos del vehículo sin recurrir a un convertidor DC-DC.

5.6.3.3 Especificaciones finales. El subsistema de control diseñado está conformado por un relé controlador de tipo on-off, cuyo funcionamiento depende de la información de temperatura de celda provista por termistores tipo ADC conectados a un sistema gestor de batería. El rango de temperaturas de operación de este sistema se encuentra entre los 40°C y 45°C. El relé controlador es un Omron G6S de 12V, las especificaciones se encuentran en el anexo E.

Imagen 68. Relé controlador



Fuente: RS Components. G6S-2 12DC | Relé sin enclavamiento Omron G6S, DPDT, bobina 12V dc, Montaje en PCB | RS Components. [Consultado el Oct 28, 2019]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/reles-sin-enclavamiento/3266900/>

5.7 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL

Este subsistema se compone del chasis del vehículo, el compartimiento de las baterías con sus respectivos tubos de refrigeración, y los anclajes del intercambiador de calor, el tanque de almacenamiento y las tuberías flexibles. En este objetivo no se tratará a profundidad el análisis de fuerzas mecánicas de los componentes involucrados, ya que este apartado no hace parte del objeto principal del presente proyecto.

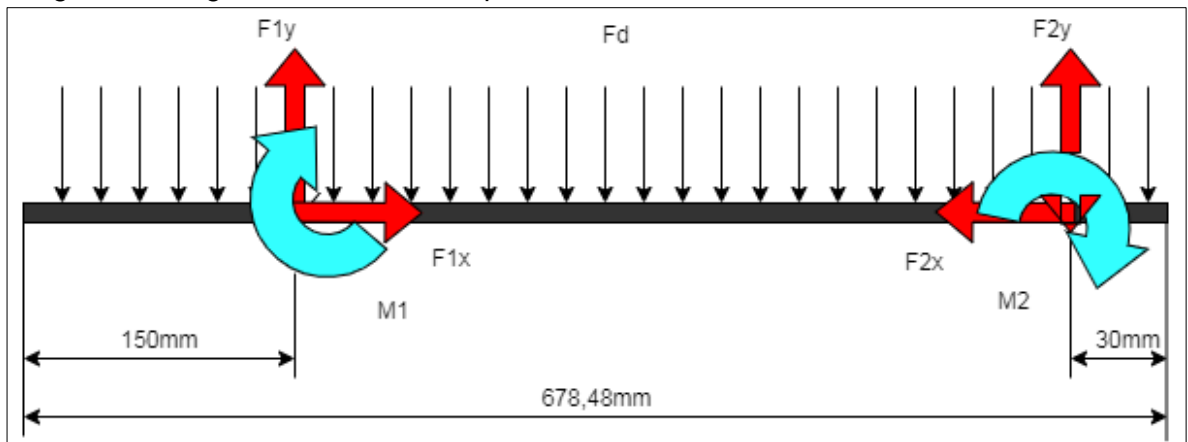
5.7.1 Diseño de compartimiento de batería con tubería de refrigeración.

Debido a la nueva incorporación del sistema de gestión térmica en las baterías, se necesita diseñar un compartimiento que contenga los módulos de baterías con sus respectivas tuberías de refrigeración.

5.7.2 Estado de cargas estructurales del compartimiento. Los parámetros de altura y espesor no se encuentran restringidos a nivel de las dimensiones del vehículo de estudio; pero son los más susceptibles a cargas de tipo estructural del sistema, ya que debe soportar el peso de las celdas y la tubería de refrigeración a máxima capacidad.

5.7.2.1 Peso total de batería por módulo. Estos compartimientos deben albergar a las baterías del kart, las cuales conforman el componente más pesado del vehículo sin contar al piloto. El módulo de baterías se presenta como una carga distribuida uniforme a lo largo del compartimiento.

Imagen 69. Carga distribuida de compartimiento



Fuente: elaboración propia

Para el análisis de esta clase de cargas, la carga distribuida se convierte en una carga puntual localizada en la mitad de la sección. Para calcular el peso más crítico de la batería, se multiplica el peso de cada celda por el número de celdas por módulo, el cual es de quince. Según las especificaciones técnicas de la celda, el peso correspondiente es de 1,7kg; este peso se multiplica por el número de celdas por módulo, el cual es de 15.

$$W_{bm} = m_{bc} g N_{bcm}$$

Donde:

W_{bp} = Peso del módulo de batería.

m_{bc} = Masa de celda por especificaciones.

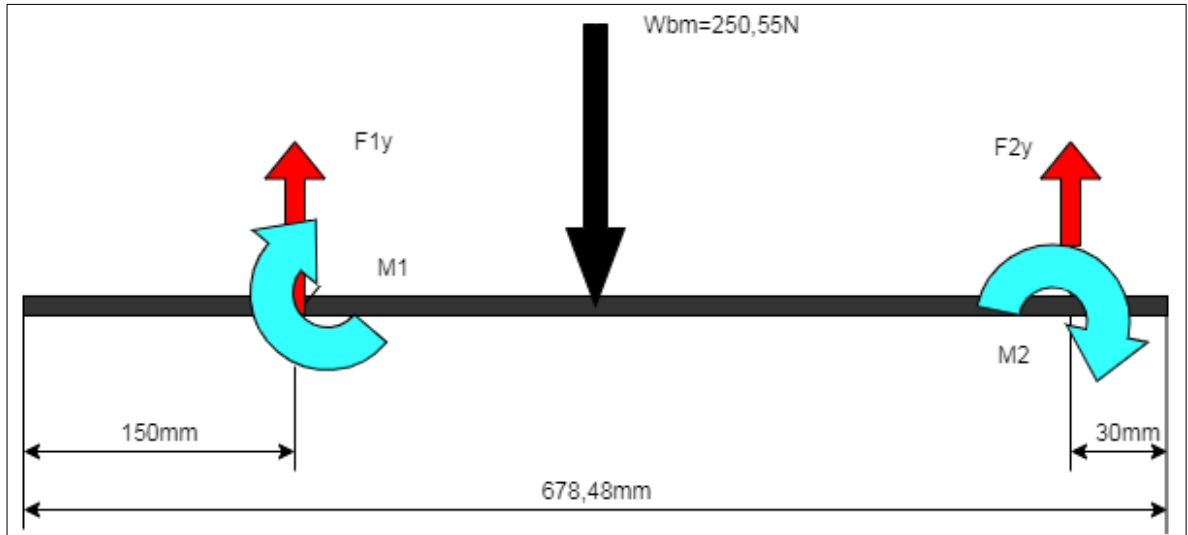
g = Gravedad.

N_{bcm} = Número de celdas por módulo.

$$W_{bm} = 1,7kg \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 15 = 250,55N$$

5.7.2.2 Análisis de fuerzas del compartimiento. El peso de cada módulo de baterías es de 250,55N. Con esta información, se procede al análisis de fuerzas del compartimiento, para la posterior selección del grosor de pared más adecuado.

Imagen 70. Diagrama de fuerzas de compartimiento



Fuente: elaboración propia

El paso siguiente es la solución estática del diagrama de fuerzas. Los empotramientos corresponden a la sujeción del compartimiento al chasis del kart. Dado que la viga es estáticamente indeterminada por el doble empotramiento, se procede a utilizar ecuaciones de compatibilidad para resolver la indeterminación. Por tal razón es necesario simplificar aún más el diagrama de fuerzas, suprimiendo los extremos que se encuentran fuera de los apoyos, tratando el comportamiento como viga doblemente empotrada.

Como primer paso, se seleccionan ambos momentos como redundantes y se procede a estas ecuaciones, con el fin de encontrar las reacciones⁴⁶.

$$F_{1y} = \frac{W_{bm}b}{L'} + \frac{M_1}{L'} - \frac{M_2}{L'}$$

⁴⁶ GOODNO, Barry J. and GERE, James M. Mechanics of materials. 9th edition, SI ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2018 p.771

$$F_{2y} = \frac{W_{bm}a}{L'} - \frac{M_1}{L'} + \frac{M_2}{L'}$$

Solucionando este par de ecuaciones, las fórmulas para hallar las reacciones se mencionan a continuación.

$$M_1 = \frac{W_{bm}ab^2}{L'^2} = \frac{250,15N \times 0,18924m \times (0,30924m)^2}{(0,4988m)^2} = 18,21Nm$$

$$M_2 = \frac{W_{bm}a^2b}{L'^2} = \frac{250,15N \times (0,18924m)^2 \times 0,30924m}{(0,4988m)^2} = 11,14Nm$$

$$F_{1y} = \frac{W_{bm}b^2}{L'^3} (L' + 2a)$$

$$F_{1y} = \frac{250,15N \times (0,30924m)^2}{(0,4988m)^3} \times (0,4988m + 2 \times 0,18924m) = 169,37N$$

$$F_{2y} = \frac{W_{bm}a^2}{L'^3} (L' + 2b)$$

$$F_{2y} = \frac{250,15N \times (0,18924m)^2}{(0,4988m)^3} \times (0,4988m + 2 \times 0,30924m) = 80,78N$$

Con el cálculo de reacciones, se concluye que el nivel de fuerzas no alcanza niveles críticos de falla en el compartimiento, flexibilizando la selección del material y las características de grosor, que es el paso final.

5.7.2.3 Grosor mínimo de pared inferior requerido. El grosor de pared a hallar depende de dos factores, los cuales son el factor de seguridad y el material del compartimiento.

El factor de seguridad es un criterio de falla diseñado para restringir el estado normal de carga operativa de un sistema, con el fin de establecer un margen de maniobrabilidad para evitar fallas en materiales y sistemas.

$$FOS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{adm}}$$

El material del compartimiento es en policarbonato, debido a su uso extensivo en el mundo del karting. Considerando su respectivo límite de fluencia⁴⁷ es de 40MPa, se calcula el esfuerzo admisible con un factor de seguridad de 5.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FOS} = \frac{40MPa}{5} = 8 MPa$$

Con este esfuerzo admisible, se procede al cálculo del grosor mínimo de pared, perteneciente a la parte inferior del compartimiento.

$$\sigma_{adm} = \frac{W_{bm}}{x_v y_v} \rightarrow y_v = \frac{W_{bm}}{x_v \sigma_{adm}}$$

$$y_v = \frac{250,15N}{0,22198m \times 8 MPa} = 1,4 \times 10^{-4}m$$

Con este dato, se concluye que el estado de carga nunca va a comprometer la seguridad del compartimiento. El siguiente paso es averiguar un grosor comercial para proceder al modelado del compartimiento, el cual es un componente hecho a medida. Por criterio del diseñador, se opta por trabajar un grosor de 1,5mm.

$$t_w = 0,0015m$$

5.7.3 Dimensiones principales. Teniendo en cuenta el área máxima disponible de 800mm en el eje X, ya que se omite el espacio de la tubería flexible, y 230mm en el eje Y, procediendo a calcular el área de ocupación total de la batería con las tuberías de refrigeración, más la mitad de la conexión en los puertos, ya que el conector se localizará afuera del compartimiento, se considera el grosor de pared previamente obtenido.

$$x_t = L_{bp} + 2(b_o + t_w)$$

Donde:

x_t = Longitud total del compartimiento.

L_{bp} = Longitud del módulo de baterías.

b_o = Ancho exterior de tubería de refrigeración.

t_w = Espesor de compartimiento de baterías.

⁴⁷ MATWEB,LLC. Overview of materials for Polycarbonate, Molded. [Consultado el Oct 28,2019]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84b257896b674f93a39596d00d999d77>

$$x_t = 0,586m + 2 \times (0,0015m + 0,04474m)$$

$$x_t = 0,67848m \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 678,48mm < 800mm$$

La longitud principal del compartimiento es de 675mm, aunque esta distancia solamente abarca el módulo de baterías y la tubería de refrigeración. Este cálculo se repite

$$y_t = W_{bp} + 2(b_o + t_w)$$

Donde:

y_t = Ancho total de compartimiento.

W_{bp} = Ancho del módulo de baterías.

b_o = Ancho exterior de tubería de refrigeración.

t_w = Espesor de compartimiento de baterías.

$$y_t = 0,1295m + 2 \times (0,0015m + 0,04474m)$$

$$y_t = 0,22198m \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 221,98mm < 230mm$$

$$y_t = 218,98mm < 230mm$$

La dimensión mínima en el eje Y es de 218, 98mm, estando dentro del rango máximo posible para esta dimensión. El paso siguiente es el cálculo de la altura del compartimiento, el cual no presenta restricciones de espacio, siguiendo la misma metodología empleada en las dos dimensiones anteriores.

$$z_t = H_{bp} + 2t_w$$

Donde:

z_t = Altura total del compartimiento.

H_{bp} = Altura del módulo de baterías.

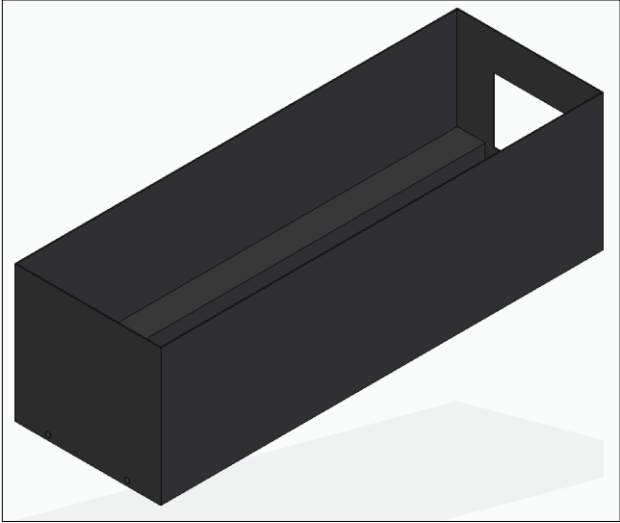
t_w = Espesor de compartimiento de baterías.

$$z_t = 0,206m + (2 \times 0,0015m)$$

$$z_t = 0,209m \times \left(\frac{1000mm}{1m}\right) = 209mm$$

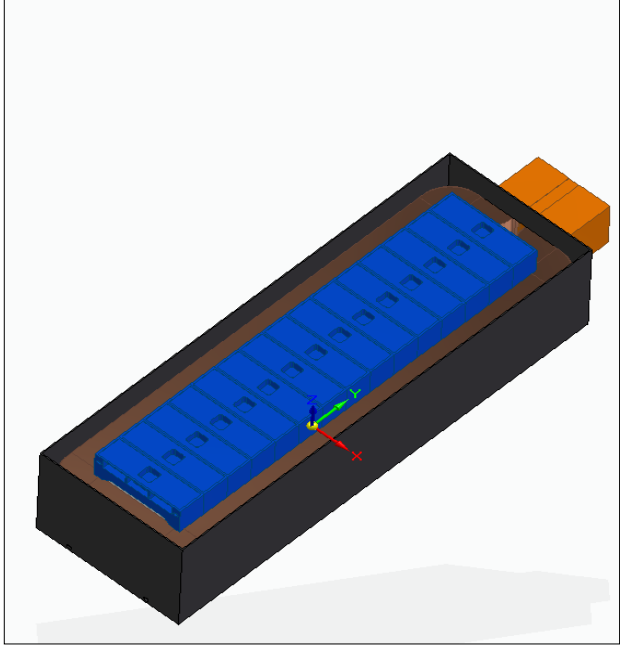
Con este valor numérico concluye el dimensionamiento del compartimiento de baterías.

Imagen 71. Compartimiento de baterías



Fuente: elaboración propia

Imagen 72. Ensamble módulo de baterías

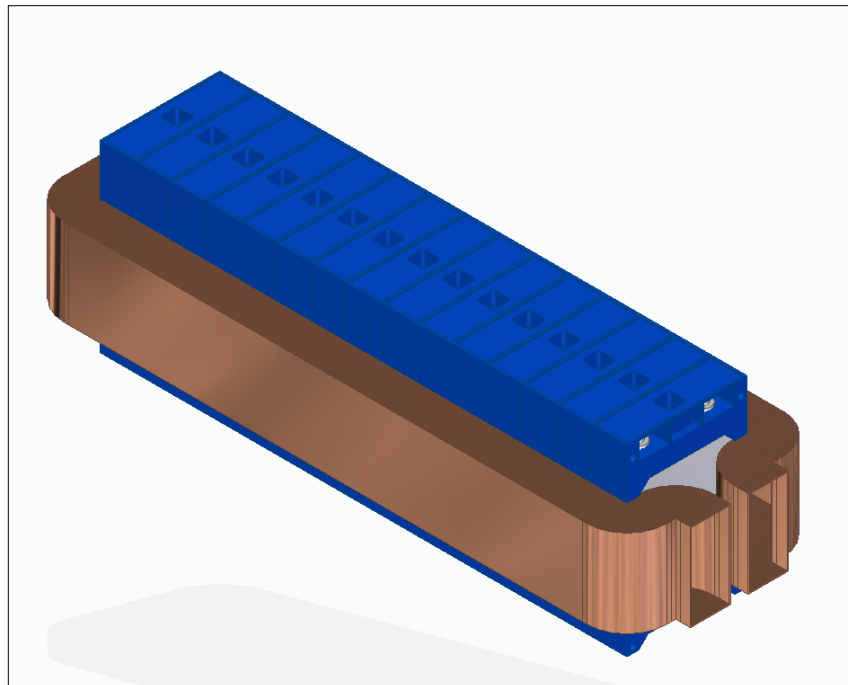


Fuente: elaboración propia

6. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA MEDIANTE SIMULACIÓN

En este apartado, se van a mostrar los resultados arrojados de las respectivas simulaciones del sistema diseñado, usadas para analizar el comportamiento térmico del sistema cuando se encuentra en condiciones de funcionamiento, enfatizando en la sección más crítica del sistema, la cual está compuesta por el módulo de baterías y la tubería rígida de refrigeración, lugar donde está centrado el objetivo general del presente proyecto. A continuación se describe el orden utilizado para realizar el presente procedimiento.

Imagen 73. Ensamble tubería de refrigeración



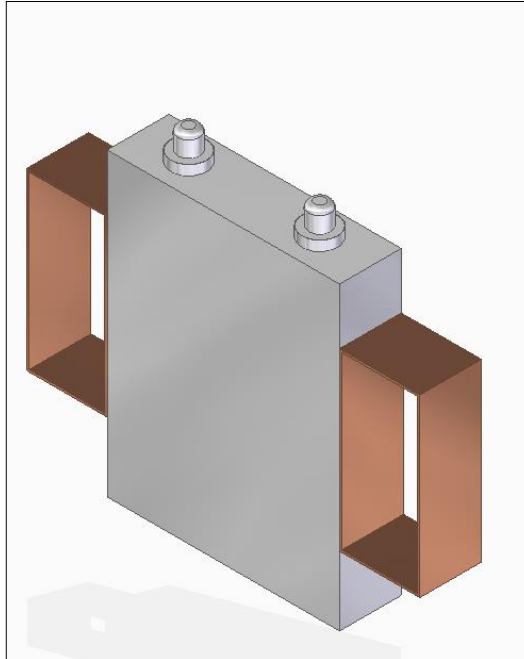
Fuente: elaboración propia.

6.1 COMPONENTE CRÍTICO A SIMULAR

Con el fin de reducir el costo computacional, el cual es excesivamente alto si se simula todo el sistema, y la máxima libertad que el sistema pueda otorgar, se realizan algunas simplificaciones en el modelo, las cuales no afectan los resultados y facilitan el análisis de resultados, debido a que la carga térmica es aplicada de forma simétrica. Por lo tanto, el modelo se puede simplificar por las relaciones de simetría.

El total de módulos de batería presentes en el vehículo es de dos. Por tal razón, es conveniente realizar el análisis térmico en una sola celda con tubería de refrigeración. El comportamiento presentado en esta celda es exactamente igual en todo el sistema. Para este análisis no se tendrá en cuenta la caja contenedora de los módulos, ni los soportes plásticos de las celdas.

Imagen 74. Celda con tubería de Refrigeración



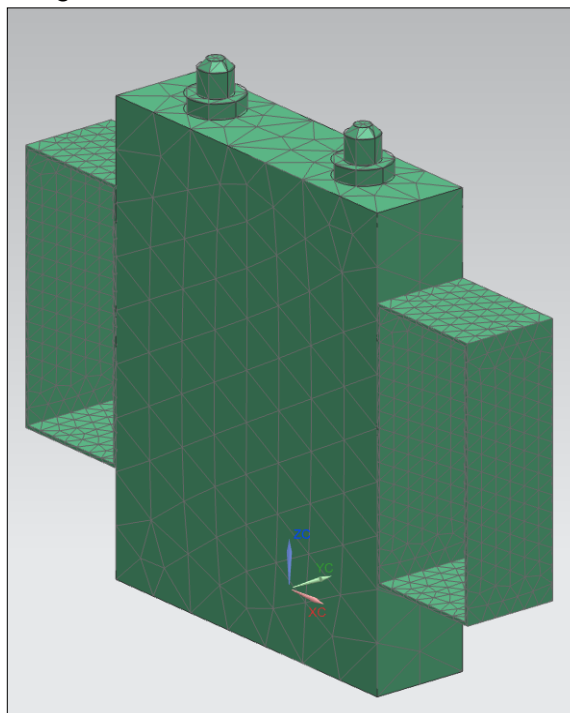
Fuente: elaboración propia.

6.2 PROCESO DE SIMULACIÓN

Para el intercambiador de calor, se opta por usar en solucionario Nastran número153 del software NX, el cual se especializa en fenómenos de transferencia de calor, con el fin de evaluar el comportamiento del fluido de refrigeración al interior del intercambiador.

6.2.1 Enmallado. Se realizan enmallados diferentes, tanto para el set de baterías, como para las tuberías de refrigeración, cada una tiene tamaños diferentes, con el fin de evitar la formación de puntos de singularidad, los cuales pueden alterar los resultados arrojados por las simulaciones.

Imagen 75. Enmallado de celda con tubería



Fuente: elaboración propia

Las mallas de los componentes se muestran en la tabla descrita a continuación, incluyendo la asignación respectiva de materiales.

Tabla 14. Especificaciones de malla de celda

Malla inicial de celda	
Criterio	Valor numérico
Nº de elementos	2837
Material	Aluminio 6061
Tipo de elementos	CTETRA4
Tamaño de elemento	18,5mm

Fuente: elaboración propia.

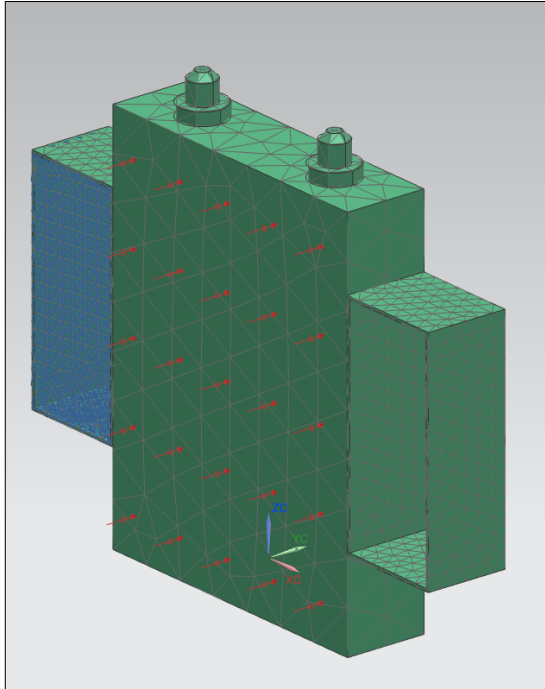
Tabla 15. Especificaciones de malla de tubería

Malla inicial de tubo	
Criterio	Valor numérico
Nº de elementos	1705
Material	Cobre C10100
Tipo de elementos	CTETRA4
Tamaño de elemento	6,08mm

Fuente: elaboración propia

6.2.2 Aplicación de cargas térmicas y condiciones de borde. La carga térmica principal es la generación de calor proveniente de las baterías, la cual se reduce a la mitad por principio de simetría, ya que solamente se analiza un solo módulo; por lo tanto, el comportamiento presentado en este compartimiento será replicado de forma exactamente igual en el otro compartimiento.

Imagen 76. Condiciones de borde en Celda con tubería



Fuente: elaboración propia

Se aplican unas restricciones de convección en las paredes interiores de la tubería de entrada, utilizando el coeficiente convectivo del líquido de $10469,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, con una temperatura de 10°C a la entrada, y se aplica un flujo de calor de $13277,4 \text{ W/m}^2$, producto de la generación de calor de la celda en su área longitudinal, la cual se replica en el resto de la batería.

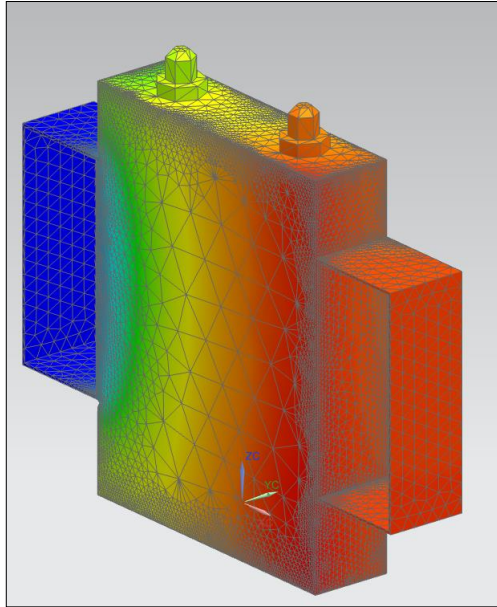
Tabla 16. Condiciones de borde de la presente simulación

Tabla de restricciones		
Criterio	Valor numérico	Malla
Coeficiente de Convección	$10469,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	Tuberías
Temperatua de Fluido entrada	10°C	Tuberías
Flujo de Calor	$13277,4\text{W/m}^2$	Celda

Fuente: elaboración propia

6.2.3 Ejecución de simulación. Finalizado en proceso previamente descrito, se procede a correr la primera simulación, la cual indica si existen puntos de singularidad y si el proceso de carga térmica fue aplicado de forma correcta. EL paso siguiente es la recopilación de datos de tiempo de simulación, número de elementos, temperatura simulada y porcentaje de desviación absoluto y relativo.

Imagen 77. Perfil de temperaturas de Celda con tubería



Fuente: elaboración propia

6.2.4 Análisis de resultados. El total de simulaciones realizadas fue de cinco; en cada una de las simulaciones se realizaron refinamientos de tipo local en las zonas de contacto entre la celda y la tubería de refrigeración, reduciendo a la mitad el tamaño del elemento usado en estas secciones, ya que presentan las condiciones más críticas de operación. En el transcurrir de las simulaciones, se pudo comprobar la convergencia de las mallas, debido a la reducción de la desviación de la máxima temperatura computada con respecto al valor teórico y al respectivo error relativo.

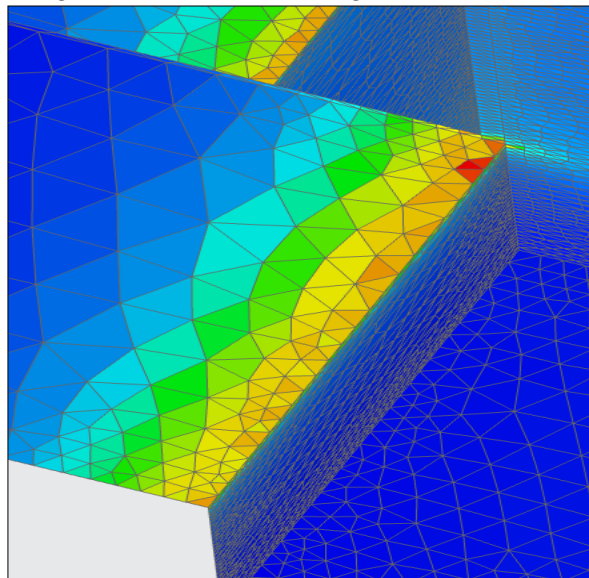
Tabla 17. Resultados de simulación de celda

Nº Sim.	Nº El.	x max.(mm)	t (s)	T. Sim. (°C)	T. lím. (°C)	% Abs	%Rel
1	1705	18,5	5	42,92	50	14,16	0,329916
2	2053	9,25	1	43,1	50	13,8	0,320186
3	6064	4,625	2	43,5	50	13	0,298851
4	19159	2,3125	3	43,76	50	12,48	0,285192
5	59171	1,15625	6	43,78	50	12,44	0,284148

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con el último perfil de temperaturas mostrado, la temperatura máxima de la celda de batería es de 43,8 °C; el incremento de la temperatura es un 12% más bajo con respecto a la temperatura teórica de 50°C, comprobando la viabilidad de este sistema aplicado al vehículo estudiado. Por último, se verifica la existencia de calor residual en el sistema, el cual se presenta en la unión conformada por la tubería rígida de refrigeración y las celdas electroquímicas, arrojando un valor numérico de 27,3 Watts por celda, lo cual equivale a 408 Watts para cada uno de los dos módulos de baterías presentes en el vehículo.

Imagen 78. Calor residual generado.



Fuente: elaboración propia.

Si se desea un estudio de comportamiento con una mayor exactitud a los resultados mostrados, se recomienda usar modelos térmicos más especializados vía programación, debido a la gran existencia de modelos de simulación térmica provistos por los programas de software especializado disponibles.

7. MANUALES

En esta sección del correspondiente trabajo se elaboran los manuales de instalación, operación y mantenimiento del respectivo sistema de refrigeración. Se busca que sean entendibles y prácticos, con el fin de comprender los aspectos concernientes a los apartados de instalación, operación y mantenimiento durante su ciclo de funcionamiento.

7.1 MANUAL DE INSTALACIÓN

La instalación es el proceso más complejo del sistema de gestión térmica, ya que de este proceso depende el correcto funcionamiento de éste en su fase de operación. Por tal razón, es necesario establecer un orden específico para la instalación del sistema, el cual debe de ser seguido tal y como se encuentra escrito en el siguiente apartado.

7.1.1 Ensamble de compartimientos de batería. Antes de proceder a la instalación del sistema, se ensamblan previamente los tres componentes que contiene esta cavidad, los cuales son los tubos de refrigeración y el módulo de baterías. Este proceso se debe hacer para cada uno de los dos módulos presentes en el vehículo. El paso a paso del proceso de ensamble de describe a continuación.

1. Inserte los protectores inferiores de las celdas en el módulo.
2. Inserte la varilla aseguradora de los protectores inferiores. No apriete por completo hasta instalar las celdas.
3. Inserte los tubos metálicos de refrigeración de la sección de baterías en el compartimiento.
4. Inserte las celdas una a una con sus respectivos termistores, ingresando bajo ajuste en los protectores inferiores.
5. Instale bajo ajuste el protector superior de la celda uno con su consecutiva.
6. Conecte ambas celdas en serie.
7. Repita los pasos 5 y 6 hasta culminar con todas las celdas.
8. Inserte la varilla aseguradora de los protectores superiores.
9. Apriete las varillas aseguradoras de los protectores superiores e inferiores.

10. Cierre el compartimiento de baterías.

Las ilustraciones correspondientes al paso a paso de esta sección del manual se encuentran en el anexo F.

Imagen 79. Módulo de baterías ensamblado



Fuente: elaboración propia.

7.1.2 Instalación de componentes. Una vez los compartimientos están armados siguiendo cada uno de los lineamientos planteados en el numeral 7.1.1, se procede al montaje de los siguientes componentes en el chasis del kart.

1. Instale los compartimientos en los soportes del chasis del kart.
2. Instale el intercambiador de calor en su respectivo soporte estructural.
3. Instale el conjunto formado en la parte posterior del vehículo.
4. Instale la bomba hidráulica en su soporte cercano al intercambiador.

7.1.3 Conexiones. El último paso para la instalación está compuesto por las conexiones entre componentes del sistema de gestión térmica.

1. Conecte el puerto de conexión a la sección saliente de la tubería rígida de refrigeración.
2. Aplique sellante en la unión para garantizar la estanqueidad del sistema.
3. Repita los pasos 1 y 2 para el otro módulo.
4. Conecte los extremos de tubería de color rojo (fluido caliente) en los puertos de conexión. Cerciórese que las conexiones estén paralelas.
5. Conecte la tubería en la T de unión.
6. Conecte otra sección de tubería de color rojo a la T de unión y la bomba hidráulica.
7. Conecte la última sección de tubería de color rojo entre el intercambiador y la bomba hidráulica.

8. Repita los pasos 4 y 5 para la tubería de color azul (fluido frío).
9. Conecte la última sección de tubería de color azul entre la T de Unión y el intercambiador de calor.

El proceso finaliza con el llenado del intercambiador de calor con el fluido de refrigeración.

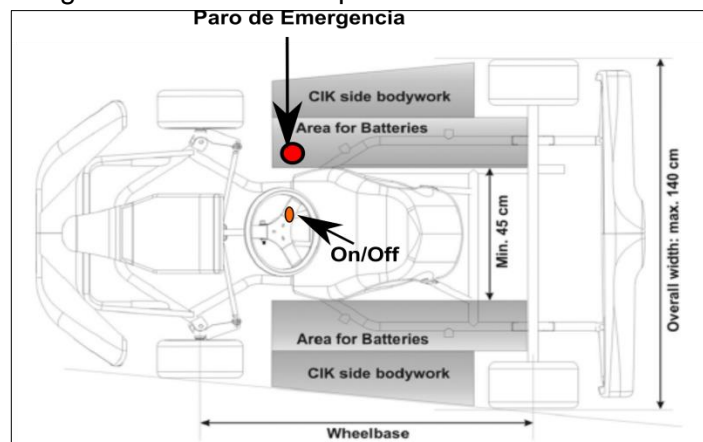
7.2 MANUAL DE OPERACIÓN

La operación se da mediante la información manejada por el gestor de batería, el cual tiene información de la temperatura de la batería, y está encargado de activar y desactivar el controlador on-off de la bomba hidráulica dependiendo de la información de temperatura de los sets de baterías. Cabe resaltar que este manual no va a tratar ningún aspecto concerniente al manejo del vehículo, siendo responsabilidad neta del usuario. Su paso a paso se expone a continuación.

1. Inspeccionar visualmente las conexiones de mangueras.
2. Inspeccionar nivel de fluido de refrigeración, y añadir en caso de ser necesario.
3. Encender el vehículo.
4. Conducir el vehículo. (El sistema se debe accionar de forma automática)
5. Detener el vehículo en una zona segura (preferiblemente área de pits).
6. Apagar el vehículo.
7. Repetir el paso número 1.

Nota: Nunca apagar el vehículo cuando éste se encuentre el movimiento, puede causar pérdida de control y accidentes fatales.

Imagen 80. Botones de operación del vehículo



Fuente: CIK- FIA. Règlement Technique Pour Les Karts Electriques (E-Karting). p. 39 - Autor.

7.3 MANUAL DE MANTENIMIENTO

El presente sistema de gestión térmica se diseñó con el fin de requerir el menor mantenimiento posible durante su vida útil, para lo cual se diseñó una tabla de control para cada uno de los ítems críticos que pueda tener, lo cual se muestra a continuación.

7.3.1 Protocolo de inspecciones. En un manual de mantenimiento, es necesario realizar un desglose de lo general a lo particular, con el fin de darle cobertura total al sistema en todos sus aspectos en la vida útil.

Cuadro 6. Cuadro de control de inspecciones de mantenimiento

CUADRO DE CONTROL DE INSPECCIONES				¿Existe Falla?		Descripción
Sistema	Componentes	Inspección tipo	Frecuencia	Si	No	
Potencia	Celdas Electroquímicas	Visual	Mensual			
		Conexiones	Trimestral			
Intercambio térmico	Aletas	Visual	Diaria			
		Limpieza	Mensual			
	Soportes	Visual	Diaria			
		Ajustes	Semestral			
	Refrigerante	Visual	Diaria			
		Rellenado	Semanal			
Circulación de Fluido	Tubería rígida	Visual	Semanal			
		Corrosión	Semestral			
	Puerto	Visual	Diaria			
		Ajustes	Mensual			
	Mangueras	Visual	Diaria			
		Ajustes	Semanal			
	Bomba	Visual	Mensual			
		Ajuste Soportes	Semanal			
Control	BMS	Continuidad Eléctrica	Anual			
	Relé Controlador	Continuidad Eléctrica	Anual			
Estructural	Compartimiento	Visual	Diaria			
		Ajustes	Trimestral			
	Tornillos	Visual	Diaria			
		Ajustes	Semanal			
	Chasis	Visual	Diaria			
		Ajustes	Semanal			

Fuente: elaboración propia

7.3.2 Protocolos de falla. Todo sistema, sin importar si necesita o no un programa de mantenimiento, puede ser proclive a fallas, las cuales deben tener soluciones posibles. Las fallas más comunes que se pueden presentar en el sistema de gestión térmica son tres, los cuales se centran en el no- encendido del sistema, la fuga de líquido refrigerante y la refrigeración incompleta, dada por alertas transmitidas a la unidad de gestión de batería. Los procedimientos más comunes para solucionar estas fallas se presentan a continuación.

Cuadro 7. Fallas más comunes

Listado de posibles fallas		
Falla	Posible Origen	Posibles Soluciones
El sistema no enciende	Baterías	Revisar conexiones eléctricas
	BMS	
Fuga de líquido Refrigerante	Manguera	Ajustar Conexiones terminales a todos los puntos
		Reemplazar Mangueras defectuosas
	Puerto de conexión	Aplicar sellante de Silicona en unión puerto-tubería rígida
	Tubería rígida	Ajustar tubería rígida
Reemplazar tubería por corrosión excesiva		
Refrigeración Parcial	Relé controlador	Medición de voltaje
	Intercambiador	Limpieza de aletas
		Revisar nivel de Refrigerante
	Bomba	Revisar Conexiones eléctricas
		Limpieza
Tubería rígida	Reemplazar tubería por corrosión excesiva	

Fuente: elaboración propia

8. IMPACTO AMBIENTAL

Toda actividad que implique el uso y procesamiento de recursos naturales con el fin de creación de objetos o sistemas de cualquier índole genera un impacto al ambiente. Para este caso en particular, se necesita determinar cuál es el nivel de impacto generado por el sistema de gestión térmica.

8.1 RECURSOS INVOLUCRADOS

Para el desarrollo del presente proyecto, se requiere un conjunto de recursos, los cuales generan un impacto ambiental de forma particular dependiendo del tratamiento que estos requieran.

8.1.1 Materiales sólido metálicos. Los materiales de este tipo empleados para el sistema de gestión térmica son el cobre, usado en la sección de tubería rígida, y el aluminio, empleado en el intercambiador de calor y en las baterías.

Cuadro 8. Materiales metálicos involucrados

Material	Componente
Aluminio	➤ Intercambiador de calor ➤ Área exterior de batería
Cobre	➤ Tubería rígida de refrigeración
Silicio	➤ Controlador

Fuente: Elaboración propia.

8.1.1.1 Puntos a favor. La gran ventaja de los materiales metálicos involucrados en el sistema de gestión térmica radica en su ciclo infinito de reciclaje, ya que el aluminio y el cobre son los materiales metálicos más reciclados en existencia⁴⁸, contribuyendo a la reducción de costos de obtención de estos materiales y disminuyendo el impacto ocasionado en su producción. La otra ventaja radica en la durabilidad de estos materiales, debido a la nula capacidad de biodegradación que poseen. Finalmente, estos materiales no presentarán corrosión prematura por el fluido de refrigeración, ya que es altamente compatible.

⁴⁸ CARLISLE, Stephanie; FRIEDLANDER, Efrie and FAIRCLOTH, Billie. Aluminium and Life Cycle Thinking Towards Sustainable Cities. Philadelphia, PA: Cwingen Press, 2015. 1-124 p. ISBN 978-0-9930162-2-26

8.1.1.2 Puntos en contra. Las contras principales de los materiales metálicos involucrados radica en su proceso de obtención en bruto, la cual emplea componentes químicos que afectan negativamente los ecosistemas fértiles debido a la deforestación y contaminación de fuentes hídricas⁴⁹. La sección más crítica del uso de estos materiales se da por la posible corrosión galvánica en la sección de tubería rígida en condiciones extremas de humedad atmosférica, ocasionando pérdidas en la capacidad de reutilización de material, convirtiéndolo en residuo sólido no reciclable, el cual no se degrada biológicamente.

8.1.2 Materiales sólidos no metálicos. Los materiales de esta clase se clasifican en distintos polímeros y en fibra de vidrio, cuya aplicación es vista en componentes de conexión y el contenedor de los módulos.

Cuadro 9. Materiales no metálicos involucrados

Material	Componente
Fibra de vidrio	➤ Puerto de conexión
Silicona	➤ Tubería flexible de refrigeración
Policarbonato	➤ Compartimiento de baterías

Fuente: Elaboración propia.

8.1.2.1 Puntos a favor. En términos generales, el policarbonato es uno de los plásticos más ecológicos en existencia, debido a las bajas emisiones en su proceso de producción, y contar con la posibilidad de ser reciclado de forma infinita.⁵⁰ La fibra de vidrio es uno de los materiales más comunes para aplicación de aislamientos, ya que posee menos riesgos sanitarios que el asbesto, material al cual reemplaza; su gran ventaja es el bajo monto de energía requerido para su producción. El impacto generado por el uso de silicona para las tuberías flexibles es la durabilidad que tienen, por lo cual no se necesitan reemplazar de forma constante, asimismo disminuyendo la producción de desechos; si se hace una buena disposición de este material al final de su correspondiente vida útil, se puede regular el proceso de hidrólisis en cantidades altamente dosificadas en forma de abono triturado⁵¹.

⁴⁹ GREENSPEC. Copper production & environmental impact. [Consultado el Nov 8,2019]. Disponible en: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/copper-production-environmental-impact/>

⁵⁰ BRETT MARTIN PLASTIC SHEETS. Plastic Sheets | Polycarbonate in Profile | Brett Martin. [Consultado el Nov 1,2019]. Disponible en: <http://www.brettmartin.com/en-gb/plastic-sheets/plastics-in-profile/polycarbonate.aspx>

⁵¹ ANTALA,S. L. ¿Cuales són los efectos de la silicona en la naturaleza? -07-02T12:00:16+00:00. [Consultado el Nov 1,2019]. Disponible en: <https://www.antala.es/efectos-silicona-naturaleza/>

Imagen 81. Comparación de energía usada en ciertos polímeros

Material	Energy Content (MJ/Kg)
Carbon Fibre	183-286
Glass Fibre	13-32
Polyester resin	63-78
Epoxy resin	76-80

Fuente: COMPOSITES, U. K. EMBODIED ENERGY. [Consultado el Nov 1, 2019]. Disponible en: <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/faqs/embodied-energy>

8.1.2.2 Puntos en contra. El mayor problema ambiental generado por los materiales sólidos no metálicos involucrados en el sistema de gestión térmica radica en los procesos de producción, requiriendo sustancias nocivas para la salud, en especial fosgenos y derivados, las cuales se están empezando a reemplazar por sustitutos de origen orgánico. En el caso de la fibra de vidrio, es vital darle un excelente manejo al material durante el proceso de fabricación, ya que las fibras sueltas pueden ser consideradas como un agente perjudicial para la salud y contaminar fuentes hídricas si no se manejan correctamente⁵², ya que este material aún no es reciclable. La contra principal de la silicona es su degradación cero, siendo altamente contaminante si no se hace una buena disposición correcta de las mangueras usadas.

8.1.3 Fluido refrigerante. El agua como fluido de refrigeración tiene altísimas propiedades caloríficas, pero es completamente inutilizable para otros propósitos cuando se utiliza para esta aplicación. Este recurso es considerado un elemento de primera necesidad para todas las formas de vida en el planeta y se han generado problemas de diversa índole debido a su uso inadecuado en variedad de procesos de tipo industrial. En este caso, dado el régimen de temperaturas al cual se somete el presente líquido, el impacto generado al ambiente no suele ser tan volátil en comparación con aplicaciones de tipo nuclear, o similares a gran escala. Pero si genera impacto a nivel de consumo, debido a las problemáticas de tipo social en ciertas comunidades asociadas a la escasez de este recurso natural en su forma potable, empeorando aún más la situación si no se hace una disposición correcta de este fluido cuando finalice su ciclo de funcionamiento. El impacto ambiental del fluido de refrigeración se ve enormemente reducido por la calidad de los materiales de fabricación de los componentes del sistema de gestión térmica, ya que no representan un alto riesgo de corrosión.

⁵² ESPINO, José Carlos. El manejo adecuado de la fibra de vidrio. -04-13. [Consultado el Nov 1, 2019]. Disponible en: https://impresa.prensa.com/opinion/manejo-adecuado-fibra-vidrio_0_2268523300.html

8.2 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Para obtener un criterio de evaluación de tipo numérico, se recurre al uso de la matriz de impacto ambiental (EPM)⁵³, la cual es considerada como el método más común de evaluación de impactos ambientales en trabajos de tipo académico, el cual toma como referencia de gestión ambiental ISO 14001.

8.2.1 Parámetros de evaluación. Esta matriz de impacto ambiental evalúa el daño a beneficio implicado en una actividad en específico mediante el uso de ciertos criterios.

Cuadro 10. Criterios de evaluación

Criterio	Intervalo	Calificación
Probabilidad de Ocurrencia (PO)	(0,9-1)	Seguro
	(0,7-0,89)	Muy Probable
	(0,3-0,69)	Probable
	(0-0,29)	Poco Probable
Magnitud Relativa (MR)	(0,6-1)	Muy Alta
	(0,4-0,59)	Alta
	(0,2-0,39)	Media
	(0,05-0,19)	Baja
	(0,01-0,049)	Muy Baja
Incidencia No cuantificable (INC)	(0,5-1)	Muy Alto
	(0,2-0,49)	Alto
	(0,1-0,19)	Medio
	(0,05-0,09)	Bajo
	(0,01-0,049)	Muy Bajo
Nivel de Vulnerabilidad (NV)	(0,8-1)	Alto
	(0,4-0,79)	Medio
	(0-0,39)	Bajo
Duración (DU)	(0,8-1)	Permanente
	(0,4-0,79)	Temporal (1-10 años)
	(0-0,39)	Ocasional (hasta 1 año)

Fuente: EPM and INGETEC, S. A. PROYECTO NUEVA ESPERANZA. Dic 17,. [Consultado el Nov 3,2019]. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva%20Esperanza/CAP_5.pdf - Autor.

⁵³ EPM and INGETEC, S. A. PROYECTO NUEVA ESPERANZA. Dic 17,. [Consultado el Nov 3,2019]. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva%20Esperanza/CAP_5.pdf

Con este conjunto de criterios, se procede al cálculo del impacto generado mediante la siguiente fórmula, la cual es aplicada a uno de los factores asociados al presente estudio.

Ecuación 22. Fórmula de impacto ambiental

$$CI = \{PO[0,7((MR + INC)NV) + 0,3DU]\} \times 10$$

Fuente: EPM and INGETEC,S. A. PROYECTO NUEVA ESPERANZA. Dic 17,2012. [Consultado el Nov 3,2019]. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva%20Esperanza/CAP_5.pdf

El impacto generado se da como resultado de esta ecuación el cual se clasifica en el siguiente cuadro.

Cuadro 11. Clasificación de impacto ambiental

Criterio	Intervalo	Calificación
Calificación de Importancia (CI)	(8-10)	Muy Significativo
	(6-7,9)	Significativo
	(4-5,9)	Medianamente Significativo
	(2-3,9)	Ligeramente Significativo
	(0-1,9)	Poco Significativo

Fuente: EPM and INGETEC,S. A. PROYECTO NUEVA ESPERANZA. Dic 17,. [Consultado el Nov 3,2019]. Disponible en:https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva%20Esperanza/CAP_5.pdf
– Autor.

8.2.2 Factores a evaluar. Los factores a analizar en el presente proyectos se dividen en las tres fases más críticas, las cuales se mencionan a continuación.

8.2.2.1 Obtención de recursos. Esta es la fase que causa más detrimento a nivel ambiental, ya que se requiere el uso de prácticas que van en detrimento al medio ambiente, enfatizando en los problemas de contaminación por fuentes hídricas por el uso de sustancias químicas nocivas para el procesamiento de materias primas. En esta sección se incluye la posibilidad de utilizar material reciclable a casi infinidad de ciclos.

8.2.2.2 Fabricación. Esta es la fase que menos debería impactar a nivel ambiental, ya que concentra los procesos de fabricación presentes para el sistema de gestión térmica en su totalidad. Se evaluará el impacto generado por los procesos de soldadura de aluminio y cobre, los procesos de fundición y mecanizado involucrado en la tubería rígida y el intercambiador de calor, finalizando con el moldeo de componentes no metálicos, tales como el compartimiento de baterías y el puerto de conexión. El énfasis del estudio radica en la emisión de partículas nocivas producto de estos procesos.

8.2.2.3 Residuos post-vida útil. En este apartado se evalúa el impacto generado por los componentes del sistema de gestión térmica al finalizar su vida útil y la manera de impacto al ambiente por los residuos generados. Se resalta el impacto ambiental generado a los ecosistemas circundantes que se puede generar dependiendo del tipo de tratamiento de los materiales involucrados.

8.2.2.4 Salud del piloto. Es bien sabido que las temperaturas del cuerpo humano en competencia suelen ser de un alto valor numérico; ocasionando la pérdida de fluidos vitales importantes en el transcurso del evento.⁵⁴ La afección de la temperatura de las baterías repercutiría en el contacto ocasional de las piernas con los compartimientos de batería, los cuales están fabricados de un material con baja conductividad térmica y están cerrados. La mayor afección causada al conductor del vehículo viene dada por las fuerzas g, producto de los movimientos del kart durante su conducción. Además, el piloto tiene contacto permanente con el aire ambiente.

8.2.2.5 Salud de los mecánicos. Los mecánicos y el personal de mantenimiento presentan un riesgo mayor de afecciones físicas que los pilotos, debido a la posibilidad de manipular componentes metálicos que, si bien no presentan temperaturas dañinas, pueden causar quemaduras leves si no se operan de forma correcta o entran en contacto directo con la piel por periodos prolongados de tiempo.

8.2.3 Matriz de impacto ambiental. De acuerdo con las fases previamente estipuladas, se procede a la elaboración de la correspondiente matriz de impacto, con el fin de evaluar numéricamente el impacto real generado al ambiente por el sistema de gestión térmica, la cual incluye los componentes de éste, y la posible afección humana involucrada.

⁵⁴ YAMAKOSHI, Takehiro, et al. Physiological measurements and analyses in motor sports: A preliminary study in racing kart athletes. En: EUROPEAN JOURNAL OF SPORT SCIENCE. vol. 10, p. 397-406

Cuadro 12. Matriz EPM de impacto ambiental

IDENTIFICACIÓN					EVALUACIÓN						
Etapa	Apartado	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Componente	P	MR	inc	NV	DU	CI	Importancia
Obtención	Materiales Metálicos	Degradación Excesiva de Ecosistemas	Contaminación Fuentes Hídricas	Uso de químicos nocivos	0,9	0,8	0,5	0,8	0,9	8,982	Muy Significativo
			Deforestación	Minería Extensiva	0,95	0,6	0,7	0,6	0,75	7,3245	Significativo
		Reducción de Consumo Energético	Uso de Material No Biodegradable	Material Reciclado	0,95	0,95	0,2	0,35	0,7	4,671625	Medianamente Significativo
	Materiales No metálicos	Generación Residuos Peligrosos	Humos Tóxicos	Fosgeno	0,75	0,5	0,6	0,8	0,3	5,295	Medianamente Significativo
			Contaminación fuentes hídricas	Uso de químicos nocivos	0,95	0,8	0,5	0,8	0,8	9,196	Muy Significativo
	Fluido de Refrigeración	Crisis Agua Potable	Escasez de Recursos Hídricos	Agua como Fluido de Refrigeración	0,65	0,7	0,9	0,5	0,7	5,005	Medianamente Significativo
Fabricación	Mecanizado	Emisión de Partículas Nocivas	Contaminación de Aire y Suelo	Viruta de Material Metálico	0,5	0,3	0,35	0,3	0,2	0,9825	Poco Significativo
	Fundición		Contaminación de Aire	Residuos de Material Metálico y No Metálico	0,4	0,6	0,3	0,4	0,3	1,368	Poco Significativo
	Soldadura		Contaminación de Aire y Suelo	Soldadura de Cobre y Aluminio	0,6	0,5	0,45	0,4	0,3	2,136	Ligeramente Significativo
	Moldeo		Contaminación de Aire	Fibras sueltas y Viruta de Materiales	0,7	0,7	0,55	0,4	0,5	3,5	Ligeramente Significativo
Disposición	Materiales Metálicos	Reutilización en Otros Procesos	Deterioro Ecosistemas	Metal Reciclado	0,95	0,8	0,55	0,65	0,7	7,830375	Significativo
	Materiales No metálicos	Vertimientos Tóxicos	Contaminación de Ecosistemas	Residuos Sólidos	0,8	0,7	0,8	0,8	0,75	8,52	Muy Significativo
	Fluido de Refrigeración		Afección de Flora y Fauna Acuática	Refrigerante Usado	0,45	0,6	0,65	0,35	0,75	2,390625	Poco Significativo
Usuarios	Piloto	Altas Temperaturas	Afectación en Resistencia Física	Módulos de Batería y Componentes	0,3	0,04	0,2	0,2	0,3	0,3708	Poco Significativo
	Mecánicos		Quemaduras Leves	Metálicos	0,5	0,45	0,2	0,6	0,6	2,265	Ligeramente Significativo

Fuente: elaboración propia.

8.2.4 Análisis de resultados. El mayor impacto ambiental del sistema de gestión térmica se produce durante el proceso de obtención de los materiales que lo compone, el uso extensivo de recursos naturales, cuyos métodos de explotación pueden ser perjudiciales si no se adaptan a la normativa vigente, aunque este impacto se ve disminuido por la escala manejada de los componentes, la cual es relativamente pequeña, y la aplicación estudiada en el karting también reduce el impacto generado, al ser considerado un mercado de nicho. También cabe destacar que la gran mayoría de sus componentes son reciclables por un gran número de ciclos; por lo tanto el sistema puede ser la base de nuevas aplicaciones al finalizar su respectiva vida útil. Con respecto a la salud del piloto, esta no se ve afectada en gran manera, debido a que este nunca tendrá contacto físico con las baterías. La mayor afectación humana generada por el sistema va dirigida a los mecánicos del vehículo, ya que existe el riesgo de quemaduras si no se usan los implementos de seguridad adecuados cuando se realicen procedimientos de emergencia, o mantenimientos que involucre la manipulación de componentes metálicos, presentes en las baterías y la tubería rígida de refrigeración principalmente.

9. VIABILIDAD FINANCIERA DEL PROYECTO

El factor determinante para el desarrollo de este diseño y lo que determina su factibilidad radica en la variable económica. Este estudio de viabilidad financiera solo incluirá los costos asociados a la ingeniería, materiales, equipamiento y fabricación de componentes a medida requeridos para el presente diseño. El presente proyecto no está patrocinado por ninguna empresa ni organización con fines lucrativos; por lo tanto, todos los valores mostrados en este estudio son únicamente de tipo académico.

9.1 COSTOS

Los costos involucrados en el desarrollo del proyecto se desglosan en los siguientes apartados, los cuales incluyen los costos de ingeniería asociados, el costo de los componentes seleccionados, y los costos asociados a una tentativa fabricación del correspondiente sistema.

9.1.1 Costos de ingeniería. Este apartado hace referencia al costo por hora invertido por el proponente del proyecto. Este apartado trata las horas invertidas en el proyecto y la indumentaria involucrada durante el proceso de desarrollo del proyecto.

Tabla 18. Costos de ingeniería

Gastos de Talento Humano					
Ítem	Unidad de Medida	Cantidad	Valor por Unidad	Valor Total	Fuente de Financiamiento
Proyectista	Horas Hombre	1250	\$ 13.800	\$ 17.250.000	Proyectista
Total Gastos de Talento Humano				\$ 17.250.000	
Gastos de Indumentaria					
Computadora	Unidad	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000	Proyectista
Software NX12	Horas	30	\$ 7.000	\$ 210.000	Proyectista
Software Solid Edge ST9	Horas	45	\$ 5.500	\$ 247.500	Proyectista
Microsoft Office	Horas	1000	\$ 2.000	\$ 2.000.000	Proyectista
Total Gastos de Indumentaria				\$ 3.957.500	
Gastos en Fungibles					
Papel	Resma	3	\$ 11.500	\$ 34.500	Proyectista
Fotocopias	Unidad	3	\$ 50	\$ 150	Proyectista
Impresiones	Unidad	800	\$ 400	\$ 320.000	Proyectista
Total Gastos en Fungibles				\$ 354.650	
Otros Gastos					
Transporte	Tiquete	32	\$ 2.400	\$ 76.800	Proyectista
Total Otros Gastos				\$ 76.800	
Total pre-imprevistos				\$ 21.638.950	
Imprevistos (3%)				\$ 649.169	
Costo Total de Ingeniería				\$ 22.288.119	

Fuente: elaboración propia.

9.1.2 Costo de componentes seleccionados. El diseño cuenta con cierto número de componentes que son seleccionados, ya sea con catálogos o por páginas web especializadas. El total de piezas es cotizado en dólares por temas de disponibilidad de componentes, el cual es convertido a pesos en una tasa representativa del mercado (TRM) de \$ 3,350, obtenida el día 6 de noviembre de 2.019.⁵⁵

⁵⁵ XE.com Inc. Conversor de divisas XE - Tipos en tiempo real. [Consultado el Nov 6,2019]. Disponible en: <https://www.xe.com/es/currencyconverter/>

Tabla 19. Costo de componentes seleccionados

Gastos de componentes seleccionados				
Ítem	Unidad de Medida	Cantidad	Valor por unidad	Valor total
Chasis	Unidad	1	\$ 12.730.000,00	\$ 12.730.000
Motor	Unidad	1	\$ 4.690.000,00	\$ 4.690.000
Celda ECPC Fortune 60Ah	Unidad	30	\$ 224.450,00	\$ 6.733.500
BMS	Unidad	2	\$ 335.000,00	\$ 670.000
Mangueras	Metro	5	\$ 43.349,00	\$ 216.745,00
Conectores	Unidad	2	\$ 16.750,00	\$ 33.500
Tuercas M8	Unidad	18	\$ 3.350,00	\$ 60.300
Bomba EPB15	Unidad	1	\$ 324.950,00	\$ 324.950
Relé controlador	Unidad	1	\$ 10.552,50	\$ 10.552,50
Soporte Intercambiador	Unidad	1	\$26.800	\$ 26.800
Total Componentes Seleccionados				\$ 25.496.347,50

Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso es la investigación de precios concerniente a los materiales principales involucrados para la fabricación de los componentes a medida y su respectivo costo.

9.1.3 Costos de fabricación de componentes a medida. Estos componentes representan el menor costo involucrado en el proyecto. El precio base para establecer los costos se basa en los productos existentes en el mercado y el costo de los materiales, ya que no existe una referencia real para determinar el costo con la precisión requerida.

Tabla 20. Costos de fabricación

Gastos Fabricación	
Ítem	Valor Medio
Intercambiador	\$ 284.750
Puerto de Conexión	\$ 50.250
Compartimiento	\$ 135.000
Tubería Rígida	\$ 134.000
Total	\$ 604.000
Imprevistos (6%)	\$ 36.240
Total	\$ 640.240

Fuente: elaboración propia.

9.1.4 Total de costos involucrados. Teniendo el valor de todos los ítems involucrados en el presente proyecto se halla en costo total del proyecto.

Tabla 21. Costo total de proyecto

Costo Total	
Criterio	Valor
Ingeniería	\$ 22.288.119
Selección	\$ 25.496.347,50
Fabricación	\$ 640.240
Total	\$ 48.424.706

Fuente: elaboración propia.

El costo total del proyecto se tasa en \$48.424.706, esto se debe a la influencia de de la TRM en la selección de componentes, donde el más costoso es el chasis del vehículo, cuyo valor está en 12,7 millones de pesos.

9.2 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD FINANCIERA

En este apartado, se determina si el proyecto es viable a nivel financiero, averiguando en cuánto tiempo se puede recuperar la inversión destinada. El criterio de evaluación usado es el valor presente neto.

9.2.1 Capital movido en la industria. Según el portal de noticias VC News Network⁵⁶ la industria del karting espera un crecimiento a nivel global hasta los US\$ 282,7 millones durante los próximos 6 años, impulsado por los principales fabricantes del sector, debido al incremento de la popularidad de esta disciplina deportiva y la creciente inclusión del deporte en la industria del entretenimiento, el cual es el factor de éxito principal de este negocio en su modalidad de rental.

9.2.2 Valor presente neto. Este es un criterio usado para determinar el valor futuro de una inversión monetaria, con base en el valor actual de ésta⁵⁷.

Ecuación 23. Valor presente neto

$$VPN = \left[\sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \right] - I_p$$

Fuente: JAGERSON, John. What is the Formula For Calculating Net Present Value (NPV)? [Consultado el Nov 8, 2019]. Disponible en: <https://www.investopedia.com/ask/answers/032615/what-formula-calculating-net-present-value-npv.asp>

Donde:

VPN: Valor presente neto.

R_t: Flujo de caja estipulado. Es una proyección del flujo de efectivo durante un tiempo determinado. Para este análisis, se manejará un valor constante de \$1.000.000.000, el cual es el promedio visto en diversos escenarios donde se practica esta actividad⁵⁸.

I_p: Costo total del proyecto.

⁵⁶ EDITOR, VCNN. Karting Market 2019-2025 Expected to Drive Galloping Growth to US\$282.7 Million By Leading Manufactures Mainly Sodikart, Praga Kart, Bizkarts | VCNN. [Consultado el Nov 10, 2019]. Disponible en: <https://www.vcnewsnetwork.com/karting-market-2019-2025-expected-to-drive-galloping-growth-to-us282-7-million-by-leading-manufactures-mainly-sodikart-praga-kart-bizkarts/>

⁵⁷ JAGERSON, John. What is the Formula for Calculating Net Present Value (NPV)? [Consultado el Nov 8, 2019]. Disponible en: <https://www.investopedia.com/ask/answers/032615/what-formula-calculating-net-present-value-npv.asp>

⁵⁸ EMIS. Xtreme Karts Colombia S.A.S. Estados Financieros. [Consultado el Nov 10, 2019]. Disponible en: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2078/php/companies/index/financials?pc=CO&cmpy=1198619&view-fins=all>

i: Tasa interna de oportunidad. Es el porcentaje de rentabilidad esperado, estando en función de las expectativas del inversionista. En este caso, la rentabilidad puede llegar al 47%⁵⁹.

t: Horizonte de evaluación. Es el tiempo contemplado para evaluar financieramente el proyecto. El tiempo estipulado es de 2 años.

La viabilidad de la inversión depende del signo del resultado arrojado por esta ecuación. Si el resultado arrojado es de valor positivo, la inversión es viable; de lo contrario, es necesario busca otras fuentes de financiamiento o explorar otro tipo de inversiones. Si el valor de la ecuación se iguala a cero, se halla la tasa interna de retorno, cuyo valor no será incluido en el presente estudio.

9.2.3 Viabilidad financiera. Con el establecimiento previo de las variables de influencia en la ecuación de gobierno, se procede al cálculo del valor presente neto.

$$VPN = \left[\frac{R_t}{(1+i)^t} + \frac{R_t}{(1+i)^t} \right] - I_p = \left[\frac{\$1.000'000.000}{(1+0,47)} + \frac{\$1.000'000.000}{(1+0,47)^2} \right] - \$48'424.706$$

$$VPN = \$1.094'617.544,91$$

Para concluir el presente objetivo, la rentabilidad generada por esta industria es suficiente para poder costear el proyecto, el cual representa el 4,85% con respecto a las utilidades netas promedio y, debido a los factores anteriormente mencionados, y a la libertad reglamentaria que tienden a tener los vehículos eléctricos en la actualidad y en un futuro cercano.

⁵⁹ URIBE,Érika. Abre una pista de Go Karts. [Consultado el Nov 10,2019]. Disponible en: <https://www.entrepreneur.com/article/266331>

10. CONCLUSIONES

- Las fuentes de potencia son el punto más crítico en el desarrollo de vehículos eléctricos a múltiple escala, aún más que las mismas plantas de propulsión.
- Se necesitan sistema de refrigeración o calentamiento si se van a emplear baterías de ion de litio a temperaturas superiores o inferiores a un rango de 15 y 55°C, cuidando que nunca reduzcan el valor de su respectivo voltaje mínimo, lo que causaría la respectiva pérdida total de propiedades en las celdas electroquímicas.
- Las fuerzas actuantes en los vehículos go-kart de tipo eléctrico no difieren en principio con las fuerzas de un automóvil convencional, pero si varía su comportamiento dinámico, debido a la regeneración energética provista por el propulsor cuando no se aplica carga.
- Los tres criterios de selección más importantes aplicados a una fuente de alimentación de ion de litio, teniendo en cuenta su correspondiente generación de calor son el voltaje de operación, la capacidad en Ah y la impedancia interna de las celdas electroquímicas.
- El sistema de gestión térmica cuenta con demasiadas restricciones a nivel dimensional, dificultando más el diseño de todos los subsistemas involucrados. Por tal razón, el empaquetado del sistema en el kart es el criterio más importante a tener en cuenta durante el proceso de diseño.
- De acuerdo con las simulaciones efectuadas, es sistema de gestión térmica es viable para su operación, debido a que la temperatura máxima de la batería llega a 43,8°C, estando 8°C por debajo de la temperatura máxima de operación.
- El paso más crítico para la instalación del sistema de gestión térmica en el vehículo es la instalación del módulo de baterías con su respectivo tubo de refrigeración, ya que éste subconjunto conforma el componente más crítico del sistema.
- El uso de materiales reciclados para la fabricación del intercambiador de calor y la tubería rígida de refrigeración reduce el impacto ambiental, debido a la infinidad de ciclos de reciclaje que presentan estos materiales.
- El costo de la inversión inicial corresponde al 4,8% del total de ingresos netos posibles para esta aplicación.

11.RECOMENDACIONES

- Se recomienda seleccionar componentes de alimentación al voltaje máximo permitido por el reglamento, el cual es de 200 Volts. Ya que la corriente necesaria para la operación puede ser más baja y hacer más manejable la carga térmica del subsistema de potencia.
- Se recomienda el uso de secciones de material conductor térmico para los espacios entre las baterías, con el fin de aumentar la transferencia de calor por conducción y reducir el ancho de la tubería rígida para una mayor compactación del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

AN Zhoujian JIA Li DING Yong DANG Chao LI Xuejiao. A Review on Lithium-ion Power Battery Thermal Management Technologies and Thermal Safety. En: 热科学学报：英文版. vol. 26, no. 5, p. 391-412

ANTALA,S. L. ¿Cuales són los efectos de la silicona en la naturaleza? -07-02T12:00:16+00:00. [Consultado el Nov 1,2019]. Disponible en: <https://www.antala.es/efectos-silicona-naturaleza/>

BERGMAN,T. L. andINCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 1-1048 p. ISBN 0470501979

BRETT MARTIN PLASTIC SHEETS. Plastic Sheets | Polycarbonate in Profile | Brett Martin. [Consultado el Nov 1,2019]. Disponible en: <http://www.brettmartin.com/en-gb/plastic-sheets/plastics-in-profile/polycarbonate.aspx>

BUCHMANN,Isidor. Lithium-based Batteries Information. [Consultado el Nov 29,2018]. Disponible en: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lithium_based_batteries

CADEX ELECTRONICS INC. BU-212: Types of Lithium-ion Batteries. Jun 20,. [Consultado el Aug 8, 2.019]Disponible en: https://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries

CADEX ELECTRONICS INC. BU-205: Types of Lithium-ion Batteries. Jul 7,. [Consultado el Aug 8; 2.019]Disponible en: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

CARLISLE,Stephanie; FRIEDLANDER,Efrie andFAIRCLOTH,Billie. Aluminium and Life Cycle Thinking Towards Sustainable Cities. Philadelphia, PA: Cwingen Press, 2015. 1-124 p. ISBN 978-0-9930162-2-26

ÇENGEL,Yunus A. Heat transfer. 2. ed., internat. ed. ed. Boston [u.a.]: McGraw-Hill, 2003. ISBN 0071151508

ÇENGEL,Yunus A. and GHAJAR,Afshin J. Heat and Mass Transfer. 5th ed. New York: McGraw Hill, 2015. 1-1208 p. ISBN 9780073398181

CENTRO DE COMERCIO INTERNACIONAL. Trade Map - Lista de los países importadores para el producto seleccionado en 2017 (Pilas y baterías de pilas, eléctricas; sus partes (exc. inservibles)). [Consultado el Nov 29,2018]. Disponible en:

https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=3||||8506||4|1|1|1|1|1|2|1|1

CIK-FIA. Règlement Technique pour les Karts Electriques (E-Karting). 2016.

CIK and FIA. CIK-FIA: Our history. [Consultado el Jan 11,2019]. Disponible en: <https://www.cikfia.com/inside-cikfia/history/our-history/browse/19.html>

DAVIES CRAIG. ELECTRIC BOOSTER PUMP (EBP15) (12V) SHORT - PART No: 9002. [Consultado el Oct 23,2019]. Disponible en: <https://daviescraig.com.au/product/ebp15-electric-booster-pump-12v-9002/ebp15-electric-booster-pump-12v-9002>

EDITOR, VCNN. Karting Market 2019-2025 Expected to Drive Galloping Growth to US\$282.7 Million By Leading Manufactures Mainly Sodikart, Praga Kart, Bizkarts | VCNN. [Consultado el Nov 10,2019]. Disponible en: <https://www.vcnewsnetwork.com/karting-market-2019-2025-expected-to-drive-galloping-growth-to-us282-7-million-by-leading-manufactures-mainly-sodikart-praga-kart-bizkarts/>

ELECTRIC CARS PARTS COMPANY. Affordable Electric Vehicle Batteries & Components from Electric Car Parts Company. [Consultado el Sep 20,2019]. Disponible en: <https://www.electriccarpartscompany.com/>

EMIS. Xtreme Karts Colombia S.A.S. Estados Financieros. [Consultado el Nov 10,2019]. Disponible en: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2078/php/companies/index/financials?pc=CO&cm py=1198619&view-fins=all>

ENGINEERING TOOLBOX. Air - Composition and Molecular Weight. [Consultado el 4 Sep.2019]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html

EPM and INGETEC S. A. PROYECTO NUEVA ESPERANZA. Dic 17,. [Consultado el Nov 3,2019]. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/documentos/Nueva%20Esperanza/CAP_5.pdf

ESPINO, José Carlos. El manejo adecuado de la fibra de vidrio. -04-13. [Consultado el Nov 1, 2019]. Disponible en: https://impresa.prensa.com/opinion/manejo-adecuado-fibra-vidrio_0_2268523300.html

GOODNO, Barry J. and GERE, James M. Mechanics of materials. ninth edition, SI ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2018. 1-1025 p.

GREENSPEC. Copper production & environmental impact. [Consultado el Nov 8, 2019]. Disponible en: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/copper-production-environmental-impact/>

HILLEMANN RICHARD <widoworx@gmail.com>. "Rattlesnake". [Correo Electronico]. 16 de Marzo de 2019. Enviado a usuarios de la universidad.

HUGHES, James. Technical Section Kart Steering Setup and Theory Article - Black Sheep Racing. [Consultado el Feb 8, 2019]. Disponible en: https://www.blacksheepacing.com/Technical_Steering2.htm

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC 1486- 6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018. ISBN 9789588585673. 153 p.

JAGERSON, John. What is the Formula for Calculating Net Present Value (NPV)? [Consultado el Nov 8, 2019]. Disponible en: <https://www.investopedia.com/ask/answers/032615/what-formula-calculating-net-present-value-npv.asp>

KANE, Mark. Kreisel Electric Cart Sets New Record - 0-100 km/h in 3.1 Seconds. Jul 20,. [Consultado el Aug 13, 2019]. Disponible en: <https://insideevs.com/news/323102/kreisel-electric-cart-sets-new-record-0-100-km-h-in-31-seconds/>

KAWA, Michael J. Fundamentals of active vs. passive thermal management. Nov 7,. [Consultado el Aug 20, 2019]. Disponible en: https://www.electronicproducts.com/Thermal_Management/Heat_Sinks_and_Thermal_Materials/Fundamentals_of_active_vs_passive_thermal_management.aspx

LAMBERT, Fred. Tesla battery degradation at less than 10% after over 160,000 miles, according to latest data. Apr 14,. Disponible en: <http://scholar.aci.info/view/157298a174900110003/162c70d9cca0001586df734>

LI,Jiling andZHU,Zhen. Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. Chalmers University of Technology, 2014. p. 1-67.
LYTRON INC. Erosion-Corrosion In Cooling Systems. [Consultado el Sep 29,2019]. Disponible en: <https://www.lytron.com/product-support/resource.cfm?aid=1240>

MATWEB,LLC. Overview of materials for Polycarbonate, Molded. [Consultado el Oct 28,2019]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84b257896b674f93a39596d00d999d77>

MITCHELL,Scott. Electric kart makes debut, Formula E eyes support race. [Consultado el Nov 11,2019]. Disponible en: <https://www.autosport.com/fe/news/124456/electric-kart-debut-fe-eyes-support-race>

MITCHELL,Scott and FERREIRA,Bruno. Massa targets karting in 2024 Olympics. Aug 11,. [Consultado el Aug 8,2019]. Disponible en: <https://www.motorsport.com/kart/news/massa-targets-karting-in-2024-olympics/3156982/>

PIS'MENNYI, Eugene; POLUPAN, Georgiy and CARVAJAL-MARISCAL,Ignacio. Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2016. 1-178 p. ISBN 9780128043974

SAMSUNG SDI CO.,Ltd. The Four Components of a Li-ion Battery. [Consultado el Dec 4,2019]. Disponible en: <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html?listType=gallery>

SASKATCHEWAN ENVIRONMENT. Water Pipeline Design Guidelines. Regina, SK: 2004.

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Promedio de Temperatura Media Anual de las Estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá-Temp. [Consultado el Sep 12,2019]. Disponible en: <http://oab.ambientebogota.gov.co/indicadores/>

SORRIDI EDITORE S.R.L, Tkart. World's first electric Kart Championship launched in Latvia. -03-29T14:20:38+00:00. [Consultado el Oct 1,2018]. Disponible

en: <https://www.tkart.it/en/features/worlds-first-electric-kart-championship-launched-in-latvia/>

SUENAGA, Takao and JO, Takahiro. Temperature Management of Li-Ion Battery Pack for Stop and Start System. 2014.

SUNDÉN, Bengt and FU, Juan. Chapter 6 - Aerospace Heat Exchangers. En: SUNDÉN, Bengt and FU, Juan eds. Heat Transfer in Aerospace Applications. Academic Press, 2017. 89-115 p. ISBN 978-0-12-809760-1

TATSUMISAGO, Masahiro; NAGAO, Motohiro and HAYASHI, Akitoshi. Recent development of sulfide solid electrolytes and interfacial modification for all-solid-state rechargeable lithium batteries. En: JOURNAL OF ASIAN CERAMIC SOCIETIES. Mar 1, .vol. 1, no. 1, p. 17-25

URIBE, Érika. Abre una pista de Go Karts. [Consultado el Nov 10, 2019]. Disponible en: <https://www.entrepreneur.com/article/266331>

VILA ROMERO, Jordi. Proyecto de un kart eléctrico. Universidad Politécnica de Catalunya, 2016.

WICKRAMARATNE, Lahiru. BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM (Formula Student). 2017.

WOODBANK COMMUNICATIONS LTD. Lithium Battery Failures _ Electropaedia. [Consultado el Feb 22, 2019]. Disponible en: https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm

XE.com Inc. Conversor de divisas XE - Tipos en tiempo real. [Consultado el Nov 6, 2019]. Disponible en: <https://www.xe.com/es/currencyconverter/>

YAMAKOSHI, Takehiro, et al. Physiological measurements and analyses in motor sports: A preliminary study in racing kart athletes. En: EUROPEAN JOURNAL OF SPORT SCIENCE. vol. 10, p. 397-406

ANEXOS

ANEXO A

DIMENSIONES DEL VEHÍCULO POR REGLAMENTO

Règlement Technique Karts Electriques / Electric Karts Technical Regulations

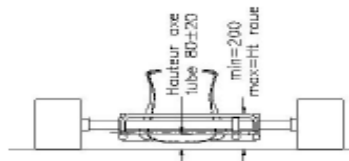
DESSINS TECHNIQUES CIK-FIA ET CCENE-FIA
CIK-FIA AND ENECC-FIA TECHNICAL DRAWINGS

Annexes au Règlement Technique

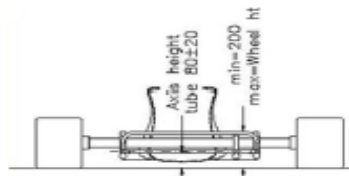
Appendices to the Technical Regulations

Dessin Technique N°2a

2 Pare-chocs (Voir Article 2.5)



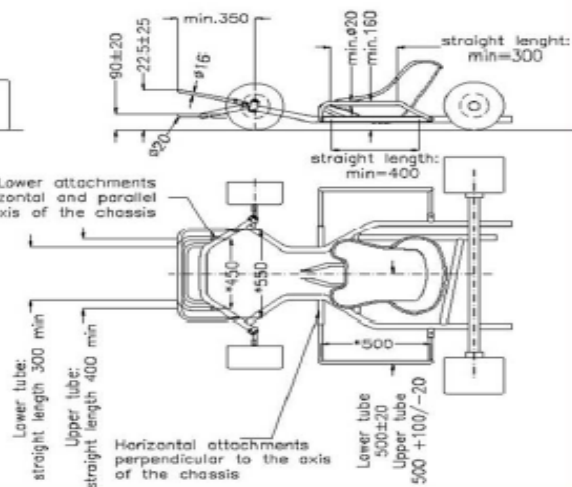
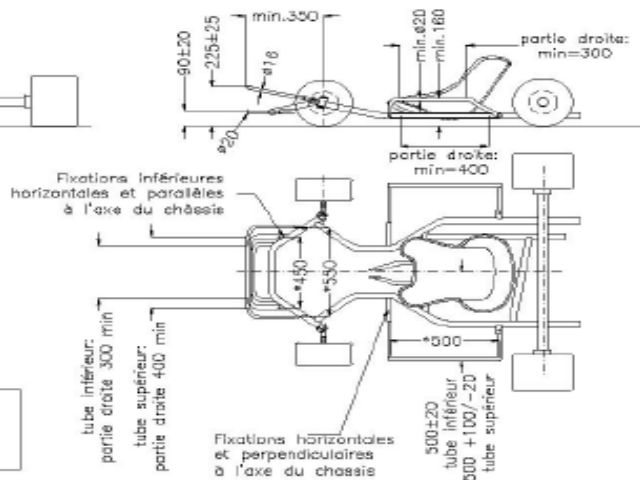
* +/- 5 mm, dimensions
axe tubes
Dimensions in mm



* +/- 5 mm, tube axes
dimensions
Dimensions in mm

Technical Drawing No 2a

2 Bumpers (See Article 2.5)



DESSINS TECHNIQUES CIK-FIA ET CCENE-FIA
CIK-FIA AND ENECC-FIA TECHNICAL DRAWINGS

Annexes au Règlement Technique

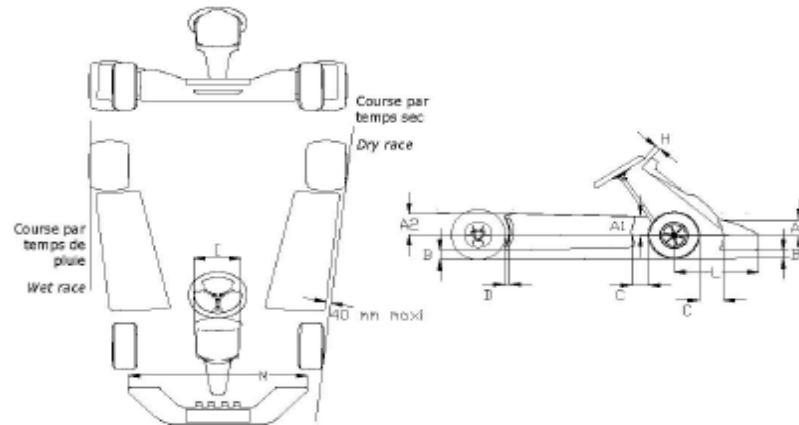
Appendices to the Technical Regulations

Dessin Technique N°2b

2 Carrosserie (Voir Article 2.5.4)

Technical Drawing No 2b

2 Bodywork (See Article 2.5.4)



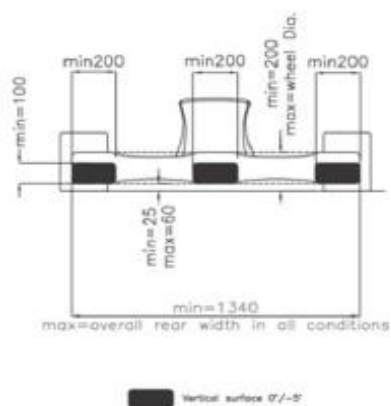
Code	Cotes en mm / Dimensions in mm	Limite / Limit	Commentaires / Comments
A1	Inférieur au rayon de la roue avant Less than the front wheel radius		Avant / Front
A2	Inférieur au rayon de la roue avant Less than the front wheel radius		Arrière / Rear
B	25 60	Minimum Maximum	Pilote à bord / Driver on board Pilote à bord / Driver on board
C	150	Maximum	
D	60	Maximum	
H	50	Minimum	
I	250 300	Minimum Maximum	
L	650	Maximum	
M	1000 Largeur extérieure du train avant External width of the front trac	Minimum Maximum	

DESSINS TECHNIQUES CIK-FIA ET CCENE-FIA
CIK-FIA AND ENECC-FIA TECHNICAL DRAWINGS

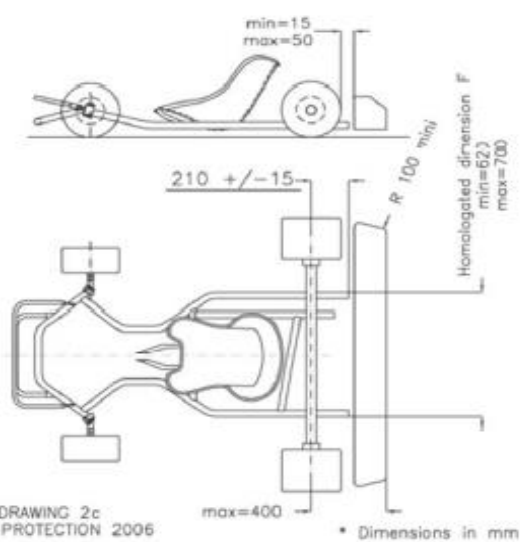
Annexes au Règlement Technique
Appendices to the Technical Regulations

Dessin Technique N°2e
2 Protection des roues arrière (voir Article 2.7)

Technical Drawing No 2e
2 Rear wheel protection (see Article 2.7)



20.10.2006



DRAWING 2c
REAR PROTECTION 2006

ANEXO B

CATÁLOGO DE TUBERÍA PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR

Round Tube



FINISH: Mill

STOCK CODE	DESCRIPTION D x T	ALLOY TEMPER	LENGTH METRE	WEIGHT KG/M	ANOD PER	STATE		
						V	N	Q
ROT69	6.35 x 0.91	6060 T5	6	0.04	100	●	●	●
ROT101	10.0 x 1.0	6060 T5	6.5	0.081	100	●	●	●
ROT1012	10.0 x 1.2	6060 T5	6.5	0.09	100	●	●	●
ROT1012-5	10.0 x 1.2	6060 T5	5	0.09	100	●	●	●
ROT1016	10.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.11	100	●	●	●
ROT1216	12.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.14	100	●	●	●
ROT1415	14.0 x 1.5	6060 T5	4	0.16	100	●	●	●
ROT1512-6	15.88 x 1.22	6060 T5	6	0.152	100	●	●	●
ROT1616	16.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.2	100	●	●	●
ROT2016	20.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.25	100	●	●	●
ROT202	20.0 x 2.0	6060 T5	6.5	0.305	100	●	●	●
ROT203	20.0 x 3.0	6060 T5	6.5	0.433	100	●	●	●
ROT2516	25.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.33	100	●	●	●
ROT253	25.0 x 3.0	6060 T5	6.5	0.56	100	●	●	●
ROT3216	32.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.42	100	●	●	●
ROT323	32.0 x 3.0	6060 T5	6.5	0.74	100	●	●	●
ROT383	38.1 x 3.25	6060 T5	6.5	0.9	119	●	●	●
ROT4016	40.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.52	125	●	●	●
ROT403	40.0 x 3.0	6060 T5	6.5	0.94	125	●	●	●
ROT4416	44.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.53	138	●	●	●
ROT443	44.4 x 3.0	6060 T5	6.5	1.141	246	●	●	●
ROT4816	48.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.63	151	●	●	●
ROT4844	48.44 x 4.47	6061 T6	6.1	1.67	152	●	●	●
ROT5016	50.0 x 1.6	6060 T5	6.5	0.66	157	●	●	●
ROT502	50.0 x 2.0	6060 T5	6.5	0.81	157	●	●	●
ROT503	50.0 x 3.0	6060 T5	6.5	1.2	157	●	●	●
ROT504	50.0 x 4.0	6060 T5	6.5	1.56	157	●	●	●
ROT505	50.0 x 5.0	6060 T5	6.5	1.909	157	●	●	●
ROT506	50.0 x 6.0	6060 T5	6.5	2.39	157	●	●	●
ROT602	60.0 x 2.0	6060 T5	6.5	0.99	188	●	●	●
ROT603	60.0 x 3.0	6060 T5	6.5	1.45	188	●	●	●
ROT605	60.0 x 5.0	6060 T5	6.5	2.34	189	●	●	●
ROT636	63.5 x 6.35	6060 T5	6.5	3.09	199	●	●	●
ROT757	75.0 x 7.0	6061 T6	6.5	4.032	238	●	●	●
ROT7632	76.2 x 3.18	6060 T5	6.5	2.01	215	●	●	●
ROT7647	76.2 x 4.75	6060 T5	6.5	2.89	239	●	●	●
ROT766	76.2 x 6.35	6061 T6	6.5	3.76	239	●	●	●
ROT802	80.0 x 2.0	6060 T5	6.5	1.32	251	●	●	●
ROT803	80.0 x 3.0	6060 T5	6.5	1.96	251	●	●	●
ROT889635	88.9 x 6.35	6061 T6	6.5	4.463	282	●	●	●
ROT1002	100.0 x 2.0	6060 T5	6.5	1.67	314	●	●	●
ROT1003	100.0 x 3.0	6060 T5	6.5	2.48	314	●	●	●
ROT10164	101.6 x 6.4	6061 T6	6.5	5.149	322	●	●	●
ROT11463	114.3 x 6.35	6061 T6	6.5	5.836	362	●	●	●
ROT1178	117.0 x 8.0	6005A T5	6.5	7.424	371	●	●	●
ROT12563	125.0 x 6.35	6060 T5	6.5	6.414	393	●	●	●
ROT1503	150.0 x 3.0	6060 T5	6.5	3.76	479	●	●	●
ROT2033	203.2 x 3.0	6060 T5	6.5	5.094	638	●	●	●

Fuente: Action Aluminium Australia Catálogo 2018 p. 18

ANEXO C

CATÁLOGO DE REFERENCIA TUBERÍA RÍGIDA PARA EL MÓDULO DE BATERÍA



Copper Tube

COPPER TUBE TO AMERICAN STANDARD ASTM B88 - TYPE K

PRODUCT CODE	NOMINAL SIZE (inch)	ACTUAL (inch)		ACTUAL (mm)		WEIGHT (kg/5.8m)	SAFE WORKING PRESSURE* (kPa)	LENGTHS/ BUNDLE
		O.D.	W.T.	O.D.	W.T.			
T17908	1/4"	3/8"	0.035	9.52	0.89	1.25	7,390	100
T17823	3/8"	1/2"	0.049	12.70	1.24	2.32	7,760	100
T17827	1/2"	5/8"	0.049	15.88	1.24	2.96	6,120	100
T55780	5/8"	3/4"	0.049	19.05	1.24	3.60	5,050	100
T17700	3/4"	7/8"	0.065	22.22	1.65	5.53	5,850	100
T17331	1"	1-1/8"	0.065	28.58	1.65	7.24	4,490	50
T70166	1-1/4"	1-3/8"	0.065	34.92	1.65	8.95	3,640	50
T17487	1-1/2"	1-5/8"	0.072	41.28	1.83	11.77	3,390	30
T61380	2"	2-1/8"	0.083	53.98	2.11	17.84	2,980	30
T76334	2-1/2"	2-5/8"	0.095	66.68	2.41	25.24	2,730	25
T80332	3"	3-1/8"	0.109	79.38	2.77	34.59	2,640	20
T53709	4"	4-1/8"	0.134	104.78	3.40	56.18	2,460	10
T26396	5"	5-1/8"	0.160	130.18	4.06	83.45	2,360	5
T61050	6"	6-1/8"	0.192	155.58	4.88	119.86	2,370	5
T20440	8"	8-1/8"	0.271	206.38	6.88	223.70	2,520	1

Fuente: Kembla Catálogo 2019 p.3

ANEXO D

CATÁLOGO DE BOMBA ELÉCTRICA PARA SUBSISTEMA DE CIRCULACIÓN DE FLUIDO

Specification		Electric Booster Pump (EBP)			
		EBP15	EBP23	EBP25	EBP40
Flow Rate (Max)	L/Min	22	23	31.4	34
	Gal/Min	5.8	6.1	8.3	9
Flow Rate @ 0.1Bar	L/Min	12.5	15	27	32.5
	Gal/Min	3.3	4	7.1	8.6
Voltage	12 Volt	Yes	Yes	Yes	Yes
	24 Volt	No	No	No	Yes
Operating Temp	C	-40 to 120	-40 to 120	-40 to 120	-40 to 120
	F	-4 to 248	-4 to 248	-4 to 248	-4 to 248
Weight	Grams	245	364	650	570
	Pounds	0.54	0.8	1.43	1.25
Pump Material		PA66	PPS	PPS	PPS
Hose Size		12.5 to 19mm	12.5 to 19mm	19mm	19mm
Self Priming		No			
Applications		Automotive, Motorbokes, Heater Systems, Intercooler, Solar			

Fuente: Fuente: Davies Craig. ELECTRIC BOOSTER PUMP (EBP15) (12V) SHORT - PART No: 9002. [Consultado el Oct 23, 2019]. Disponible en: <https://daviescraig.com.au/product/ebp15-electric-booster-pump-12v-9002/ebp15-electric-booster-pump-12v-9002>

ANEXO E

CATÁLOGO DE RELÉ CONTROLADOR

G6S

Surface-mounting Relay

●PCB Terminal Standard Models

Enclosure rating	Relay Function	Single-side stable		Single-winding latching		Double-winding latching		Minimum packing unit	
	Contact form	Model	Rated coil voltage	Model	Rated coil voltage	Model	Rated coil voltage		
Fully sealed	DPDT (2c)	G6S-2	3 VDC	G6SU-2	3 VDC	G6SK-2	3 VDC	50 pcs/tube	
			4.5 VDC		4.5 VDC		4.5 VDC		
			5 VDC		5 VDC		5 VDC		
			12 VDC		12 VDC		12 VDC		
		G6S-2-Y	24 VDC	G6SU-2-Y	24 VDC	-	-		24 VDC
			5 VDC		5 VDC				
			12 VDC		12 VDC				
			24 VDC		24 VDC				

Note 1. When ordering, add the rated coil voltage to the model number.

Example: G6S-2 DC3

Rated coil voltage

However, the notation of the coil voltage on the product case as well as on the packing will be marked as □□ VDC.

Note 2. PCB terminal standard types do not require moisture proof packaging and therefore shipped in non-moisture-proof package.

■Ratings

●Single-side Stable Model

Model	Rated voltage	Item Rated current (mA)	Coil resistance (Ω)	Must operate voltage (V)	Must release voltage (V)	Max. voltage (V)	Power consumption (mW)
G6S-2 G6S-2F G6S-2G	DC	3	46.7	64.3	75% max.	10% min.	200% (at 23°C) Approx. 140
		4.5	31	145			
		5	28.1	178			
		12	11.7	1,028			
G6S-2-Y G6S-2F-Y G6S-2G-Y	DC	24	8.3	2,880	75% max.	170% (at 23°C) Approx. 200	
		5	40	125			
		12	16.7	720			
		24	9.6	2,504			

Note 1. The rated current and coil resistance are measured at a coil temperature of 23°C with a tolerance of ±10%.
2. Operating characteristics are measured at a coil temperature of 23°C.
3. The maximum voltage is the highest voltage that can be imposed on the relay coil.

●Single-winding Latching Model

Model	Rated voltage	Item Rated current (mA)	Coil resistance (Ω)	Must operate voltage (V)	Must release voltage (V)	Max. voltage (V)	Power consumption (mW)
G6SU-2 G6SU-2F G6SU-2G	DC	3	33.3	90	75% max.	75% max.	180% (at 23°C) Approx. 100
		4.5	22.2	203			
		5	20	250			
		12	8.3	1,440			
G6SU-2-Y G6SU-2F-Y G6SU-2G-Y	DC	24	6.3	3,840	75% max.	200% (at 23°C) Approx. 140	
		5	28.1	178			
		12	11.7	1,028			
		24	5.8	4,114			

Note 1. The rated current and coil resistance are measured at a coil temperature of 23°C with a tolerance of ±10%.
2. Operating characteristics are measured at a coil temperature of 23°C.
3. The maximum voltage is the highest voltage that can be imposed on the relay coil.

●Double-winding Latching Model

Model	Rated voltage	Item Rated current (mA)	Coil resistance (Ω)	Must operate voltage (V)	Must release voltage (V)	Max. voltage (V)	Power consumption (mW)
G6SK-2 G6SK-2F G6SK-2G	DC	3	66.6	45	75% max.	75% max.	170% (at 23°C) Approx. 200
		4.5	44.4	101			
		5	40	125			
		12	16.7	720			
	DC	24	12.5	1,920		140% (at 23°C) Approx. 300	

Note 1. The rated current and coil resistance are measured at a coil temperature of 23°C with a tolerance of ±10%.
2. Operating characteristics are measured at a coil temperature of 23°C.
3. The maximum voltage is the highest voltage that can be imposed on the relay coil.

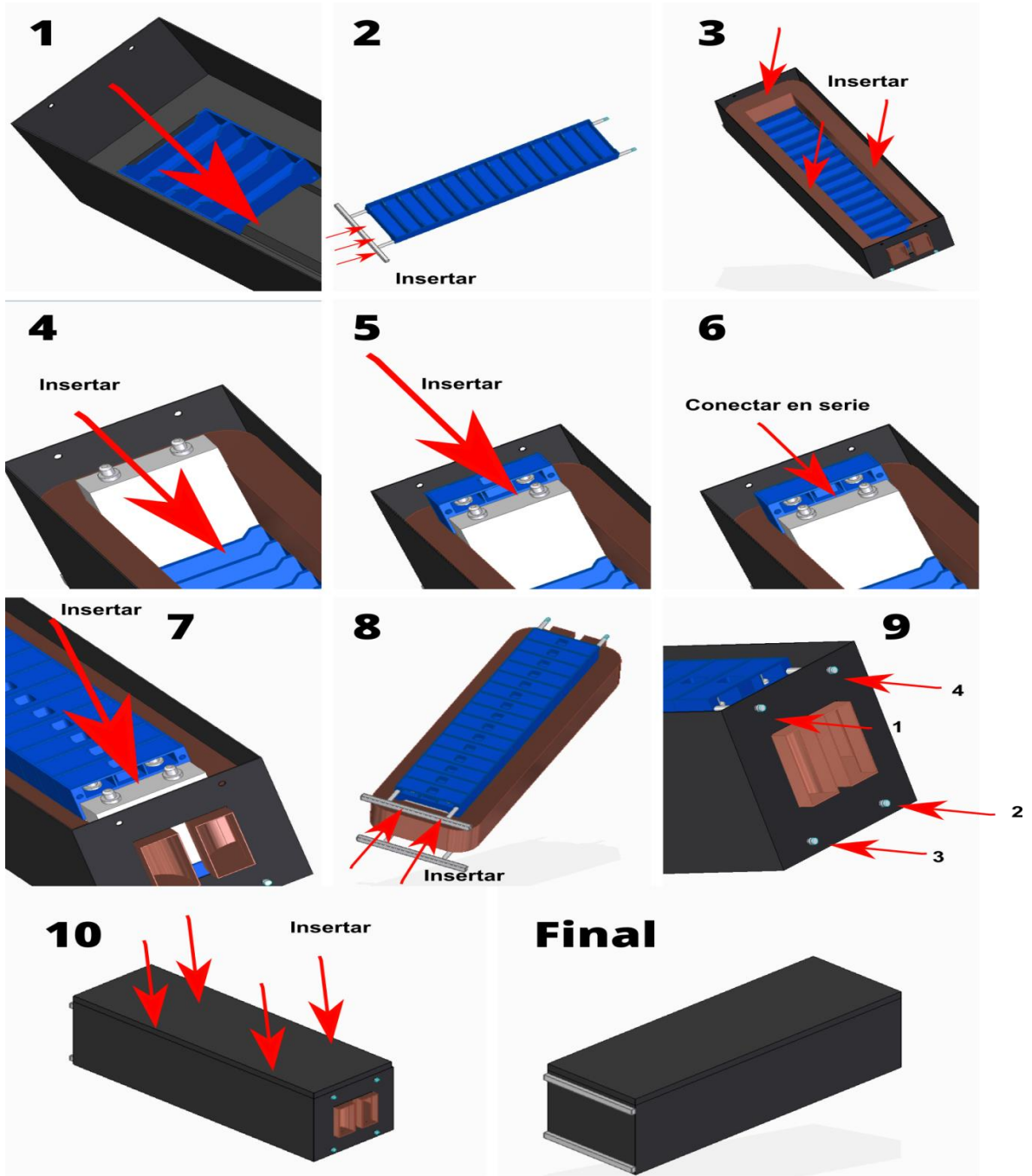
●Contacts

Item	Load	Resistive load
Contact type	Bifurcated crossbar	
Contact material	Ag (Au-Alloy)	
Rated load	0.5 A at 125 VAC; 2 A at 30 VDC	
Rated carry current	2 A	
Max. switching voltage	250 VAC, 220 VDC	
Max. switching current	2 A	

G6S

ANEXO F

ILUSTRACIONES DEL MANUAL DE INSTALACIÓN: COMPARTIMIENTO DE BATERÍAS



Fuente: elaboración propia.